



Contribuição geoquímica para o estudo das columbotantalites da Ribeira de Maçainhas (Guarda-Castelo Branco)

**Faculdade de Ciências da Universidade do
Porto**

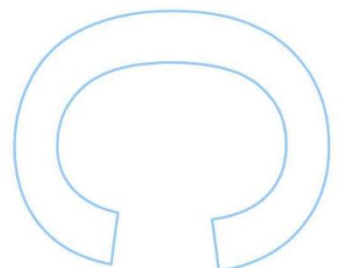
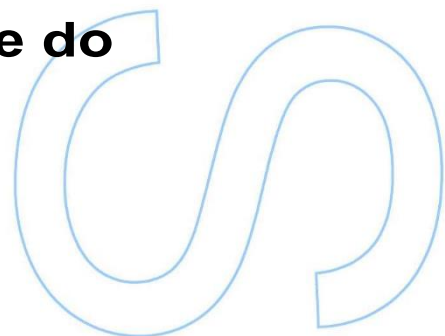
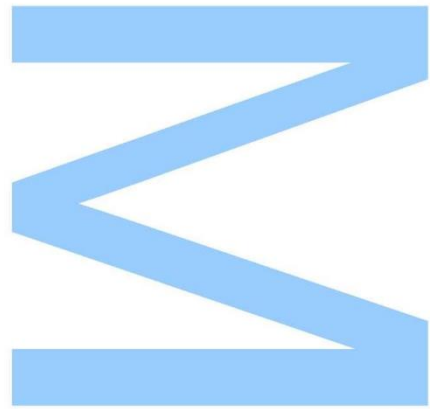
**Pedro Guilherme de Azevedo e Silva
Fernandes**

Geologia

Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território
2016

Orientador

António José Nogueira Gomes de Moura, Professor Auxiliar, Faculdade de
Ciências da Universidade do Porto



“As rochas são registos de eventos que tomaram lugar no momento em que se formaram. São livros. Possuem um vocabulário diferente, um alfabeto diferente, mas que podemos aprender a ler.”

John Mcphee

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, que foi a minha casa durante este meu percurso académico. Foi aqui que me graduei, e levo comigo algumas das melhores experiências da minha vida.

Ao Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, pois é graças ao seu investimento, na área de Geologia, que dou por findada esta minha etapa.

Ao meu orientador, o Professor Doutor António Moura, por me ter dado a oportunidade e o privilégio numa das áreas da Geologia da minha preferência. Agradeço ainda toda a paciência e a atenção prestada, pois ao longo desta etapa, sem isso, não seria possível ultrapassar as mais variadas barreiras.

Aos colegas Ricardo Ribeiro e Joana Fernandes agradeço toda a ajuda e contribuição para o desenvolvimento deste trabalho.

Deixo um especial e sincero obrigado a todos os meus amigos, que souberam lidar com todas as minhas frustrações e desabafos. Sentir todo esse apoio foi imprescindível para superar todos os obstáculos.

À minha família, que sempre me apoiou e nunca me deixou baixar os braços, deixo aqui o meu agradecimento. Reconheço que o apoio da família nunca foi tão importante como o demonstrado ao longo destes anos no Ensino Superior.

Por fim, a ti, avô, que já não estás cá, sei bem o quanto querias testemunhar este acontecimento. A ti deixo o meu último agradecimento, sob forma de homenagem, como forma de te agradecer por toda a sabedoria, toda a força e os sorrisos partilhados. Onde quer que estejas, não és tu quem se deve orgulhar, mas sim o teu neto por ter tido um avô como tu.

Resumo

Em Portugal, a produção de columbotantalites resultou da exploração de aplitopegmatitos e de *placers* ricos em Sn e Ti, sendo as columbotantalites um subproduto.

Foram publicados vários estudos sobre columbotantalites em aplitopegmatitos da região da Guarda mas nenhum estudo sobre os *placers* de Gaia-Maçainhas, os mais importantes de Portugal no conteúdo de tântalo.

Neste trabalho estudou-se, na microsonda eletrónica, um concentrado mineiro de columbotantalites das antigas minas da ribeira de Maçainhas (Beira Interior).

A maioria das columbotantalites apresenta zonamento oscilatório e irregular, característica que é devida, principalmente, à variação dos teores de Ta e Nb. Alguns cristais são homogéneos. Em ambos os casos as texturas são indicativas de uma formação magmática. Alguns cristais apresentavam, também, pequenos intercrescimentos, texturas interpretadas como de remobilização pós-magmática, de origem hidrotermal.

As columbotantalites estudadas são Columbites-(Fe) e Columbites-(Mn) e os seus teores nos elementos principais são (mínimo, médio, máximo): Ta₂O₅ – 10,58%, 30,76%, 52,19%; Nb₂O₅ – 26,43%, 45,59%, 63,74%; MnO – 4,83%, 9,79%, 14,23%; FeO – 0,01%, 7,88%, 13,81%. Os teores nos elementos menores, mais importantes, são: WO₃ – 0,70%, 1,46%, 3,22%; SnO₂ – 0,08%, 0,51%, 1,55%; TiO₂ – 0,39%; 1,78%; 3,22%.

Palavras-chave: Columbotantalite, *Placers*, Maçainhas, Geoquímica, Texturas

Abstract

In Portugal, the columbite-tantalite production has resulted from the aplite-pegmatites and placers rich in Sn and Ti exploitation, being the columbite-tantalites a by-product.

Many studies have been published about columbite-tantalites in aplite-pegmatites in the Guarda region, but no one about the *placers* deposits of Gaia-Maçainhas, the most important deposits in Portugal, in the matter of tantalum content.

In this work it has been studied, on the electronic microprobe, a mining concentrated of columbite-tantalites from the ancient mines of the Ribeira de Maçainhas (Beira Interior).

Most columbite-tantalites present oscillatory and irregular zoning, feature which is due, mainly, to the Ta and Nb content variation. Some crystals are homogeneous. In both cases, the textures indicate a magmatic formation. Some crystals present also, small intergrowths, textures interpreted as of post-magmatic remobilization, from hydrothermal origin.

The studied columbite-tantalite are Columbites-(Fe) and Columbites-(Mn) and their content in the principal elements are (minimum, mean, maximum): Ta_2O_5 – 10,58%, 30,76%, 52,19%; Nb_2O_5 – 26,43%, 45,59%, 63,74%; MnO – 4,83%, 9,79%, 14,23%; FeO – 0,01%, 7,88%, 13,81%. The contents in the most important minor elements are: WO_3 – 0,70%, 1,46%, 3,22%; SnO_2 – 0,08%, 0,51%, 1,55%; TiO_2 – 0,39%; 1,78%; 3,22%.

Keywords: Columbite-tantalite, Placers, Maçainhas, Geochemistry, Textures

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice	1
Índice de figuras e tabelas	2
Capítulo 1: Introdução	4
1.1 Objetivos e Estrutura.....	4
1.2 Ocorrências dos jazigos portugueses de tântalo.....	4
Capítulo 2. Geoquímica e tipo de jazigos do tântalo	6
2.1 O nióbio e o tântalo na crosta terrestre.....	6
2.1.1 Comportamento geoquímico do nióbio e tântalo.....	9
2.1.1.1 Solubilidade do tântalo em melts silicatados	11
2.1.1.2 Solubilidade do nióbio e tântalo em complexos hidrotermais.....	12
2.2 Tipo de jazigos de tântalo e nióbio	12
2.2.1 Jazigos de tântalo relacionados com pegmatitos (fonte primária da maioria dos placers de Sn-Ta)	15
2.2.2 Jazigos complexos peralcalinos de nióbio-tântalo-REE.....	17
2.2.3 Jazigos de tântalo±nióbio relacionados com granitos peraluminosos	18
2.2.4 Fontes secundárias de tântalo	19
Capítulo 3. Área de estudo	20
3.1 Localização Geográfica	20
3.2 Enquadramento Geológico Geral	20
3.2.1 Complexo xistograuváquico.....	23
3.2.2 Granito da Guarda.....	24
3.2.3 Rochas filonianas	24
Capítulo 4. Resultados	27
4.1 Texturas observadas.....	33
4.2 Discussão de resultados	35
Capítulo 5. Conclusões	38
Capítulo 6. Referências bibliográficas.....	39

Índice de figuras e tabelas

Figura 1 - Tabela periódica dos elementos químicos (os elementos Nb e Ta encontram-se destacados). Fonte: Tabela Periódica Completa - A Tabela Periódica dos Elementos Químicos Atualizada, 2016	6
Figura 2 - Gráfico de relação entre o raio iónico e o estado de valência (carga iónica) dos elementos (HFSE - High field strength elements; MRFE - Mantle Rock Formation elements; LILE - Large ion lithophile elements). Fonte: Stackoverflow, 2016	10
Figura 3 - Distribuição geográfica dos principais jazigos e outras ocorrências mundiais de Ta e Nb. Fonte: British Geological Survey, 2011	14
Figura 4 - Representação esquemática da relação granito-pegmatito num campo pegmatítico. Fonte: Mackay & Simandl, 2014	17
Figura 5 - Tendências típicas para a composição das columbotantalites em pegmatitos LCT. Fonte: Linnen & Cuney, 2005; Cerny et al., 1986	17
Figura 6 - Mapa demonstrativo das zonas geotectónicas de Portugal com a indicação da área de estudo. Fonte: ALEMDASAULAS'S BLOG, 2016	20
Figura 7 - Localização geográfica da área de estudo e mapa regional da área de estudo. Fonte: Neiva & Ramos, 2010.....	21
Figura 8 - Mapa geológico local da área de estudo. Adaptado de IGM, 1995	26
Figura 9 - Projeção das columbotantalites da amostra em estudo no quadrado composicional dos óxidos de Nb e Ta. A zona delimitada com tracejado preto separa as composições com estrutura da tapiolite (ponteadado superior) e da columbotantalite (ponteadado inferior)	30
Figura 10 - Diagrama Nb ⁵⁺ vs Ta ⁵⁺ para as columbotantalites da Ribeira de Maçainhas. As duas retas delimitam os campos da columbotantalite (espaço entre as retas) e da ixiolite-wodginite (espaço abaixo do limite inferior), segundo Neiva (1996)	30
Figura 11 - Projeção do número de pontos analisados de acordo com as razões Ta/(Ta+Nb) e Mn/(Mn+Fe) em cada grão de columbotantalite da amostra em estudo	31
Figura 12 - Gráficos de correlação Sn-W, Sn-Ti, Ta-Ti, Ta-Sn e Ta-W (valores em percentagens de óxidos)	32
Figura 13 - Imagens obtidas através da microsonda eletrónica revelando algumas das texturas presentes nos grãos minerais estudados.....	34
Figura 14 - Projeção das columbotantalites analisadas neste estudo e comparação com os dados de Ribeiro (2015) (campo delimitado a verde) e de Fernandes (2016) (campo delimitado a vermelho)	37
 Tabela 1 - Propriedades Físico-Químicas dos metais Nb e Ta. Fonte: Mackay & Simandl (2014); British Geological Survey, 2011	7
Tabela 2 - Principais minerais de Tântalo.....	8
Tabela 3 - Abundância dos elementos Nb e Ta, em ppm's, que são HFSE, em diferentes reservatórios. Fonte: Linnen & Cuney, 2005.....	9
Tabela 4 - Classificação petrogenética dos pegmatitos graníticos. Fonte: Cerny & Ercit, 2005.....	16
Tabela 5 - Resultado da análise, na microsonda, da amostra da Ribeira de Maçainhas	28
Tabela 6 - Resultados das fórmulas estruturais em percentagem de massa e razões Ta/(Ta+Nb) e Mn/(Mn+Fe) em percentagem calculadas para a amostra estudada.....	29

Índice de abreviaturas

CEMUP – Centro de Materiais da Universidade do Porto

CXG – Complexo Xistograuváquico

Ga – Giga-anos; Mil milhões de anos

GPS – Global Positioning System

HFSE – *High field strength elements*

LCT – família de pegmatitos enriquecidos em lítio (Li), Césio (Cs) e tântalo (Ta)

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

LREE – *light rare earth elements*

Ma – Milhões de anos

NYF – família de pegmatitos enriquecidos em nióbio (Nb), Ítrio (Y) e flúor (F)

ppm – partes por milhão

REE – Rare earth elements (elementos terras raras)

vs. - *versus*

Capítulo 1: Introdução

O estudo realizado incidiu sobre um concentrado de columbotantalites, grupo de minerais com a fórmula geral $[(\text{Mn},\text{Fe})(\text{Nb},\text{Ta})_2\text{O}_6]$ proveniente de *placers* da Ribeira de Maçainhas, local onde nas décadas de 1950 a 1970 existiram minas de Sn-Ti nas quais as columbotantalites constituíam um coproduto.

Após uma pesquisa bibliográfica, recorreu-se à microsonda eletrónica localizada no LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia), em S. Mamede de Infesta, para se proceder ao estudo pontual de grãos do concentrado.

1.1 Objetivos e Estrutura

Neste tema de dissertação, o objeto de estudo são columbotantalites de um concentrado das minas aluvionares da ribeira de Maçainhas.

Neste trabalho, os objetivos foram os seguintes:

- 1) Caracterização química do concentrado de columbotantalites produzido nas minas
- 2) Estudo da génese dos minerais estudados.

Este trabalho apresenta-se dividido em capítulos, para um acompanhamento claro e uma compreensão precisa, à medida que o tema vai sendo desenvolvido.

O Capítulo 1 compreende uma breve introdução, uma definição de objetivos que vão ser desenvolvidos ao longo do trabalho, e uma contextualização teórica e prática do assunto a ser abordado.

No Capítulo 2, irá ser apresentada uma componente teórica acerca do tema, isto é, as propriedades químicas do nióbio e do tântalo, o seu comportamento, e os tipos de jazigos nos quais se podem encontrar estes elementos.

No Capítulo 3, será feito um enquadramento geológico mais aprofundado da área de estudo.

No Capítulo 4, serão apresentados os resultados e discutidos.

Por fim, o Capítulo 5 está destinado às conclusões.

1.2 Ocorrências dos jazigos portugueses de tântalo

Os pegmatitos com columbotantalites fazem parte das mineralizações de filiação granítica que ocorrem no Norte e Centro de Portugal e encontram-se na dependência de maciços de granitos porfiroides, de duas micas, com predomínio de biotite; estes granitos são calcoalcalinos, essencialmente monzoníticos e, em relação com estes pegmatitos, encontram-se, frequentemente, ocorrências aluvionares com predomínio de cassiterite e, também ilmenite e columbotantalites (Parra & Filipe, 2001).

As ocorrências portuguesas conhecidas de columbotantalites repartem-se por 4 áreas: Serra de Arga, Gonçalo-Vela-Benespera-Belmonte-Sabugal, Chaves-Boticas-Montalegre e Sátão-Mangualde-Viseu (Parra & Filipe, 2001). Embora os pegmatitos com columbotantalites sejam frequentes nestas áreas, o seu teor é em geral muito baixo para que por si só se justifique uma exploração mineira.

A produção portuguesa de columbotantalites foi principalmente obtida como subproduto do tratamento de concentrados de cassiterite. Esta provém de pegmatitos graníticos, quer da sua exploração direta, quer indireta quando proveniente de depósitos aluvionares deles resultantes (Parra & Filipe, 2001). A produção portuguesa de columbotantalites foi principalmente um subproduto das explorações de cassiterite e, em menor escala, de explorações de quartzo e feldspato ou de berilo que são os minerais úteis mais comuns nos referidos pegmatitos.

De acordo com Parra & Filipe (2001), as maiores produções de columbotantalites derivaram da exploração dos aluviões da ribeira de Gaia (distrito da Guarda) e do rio Lima (distrito de Viana do Castelo). A partir de 1984, devido à suspensão da lavra mineira pela parte da empresa concessionária da exploração, a Dramin, na ribeira de Gaia, a produção portuguesa de concentrados de columbotantalites passou a quase inexistente.

Os aluviões e os filões e pequenas massas de pegmatitos a partir da qual foi extraída a maior parte da nossa produção de columbotantalites apresentavam rendimentos nestes minerais da ordem dos 3 a 5% da produção de concentrados de cassiterite que era o minério principal (Parra & Filipe, 2001).

Os aluviões das áreas de Gonçalo-Vela-Benespera-Belmonte-Sabugal e de Sátão-Mangualde-Viseu (sobretudo as da ribeira de Gaia) e as da Serra de Arga e os filões pegmatíticos de Chaves-Boticas-Montalegre e de Sátão constituíram o grosso da produção nacional de columbotantalites.

Os aluviões de ribeira de Gaia são depósitos cascalhentos, predominantemente cassiteríticos em que também ocorrem a ilmenite e as columbotantalites, e que ocupam a margem ocidental daquela ribeira. Os depósitos produtivos tinham espessura variável de 3 a 7 metros e assentam sobre um granito alterado (Parra & Filipe, 2001).

A área de Gonçalo-Vela-Benespera-Belmonte-Sabugal com filões pegmatíticos dotados de mineralização complexa de Be, Sn, Nb-Ta e Li, tem alguma potencialidade embora o seu interesse futuro careça de estudos atuais.

O teor médio de Nb na crosta terrestre é de 20 ppm, enquanto o teor médio de Ta é de 2,4 ppm. Quando comparados com outros elementos metálicos tais como os elementos do grupo das terras raras leves, o Nb e o Ta são mais empobrecidos na crosta continental. Isto pode ser justificado pelo facto da crosta continental ter sido formada em margens convergentes acima de zonas de subducção, tendo em conta que os magmas gerados nestes contextos são tipicamente empobrecidos nestes elementos em situações deste tipo. Tanto o Nb como o Ta apresentam semelhanças no seu raio iónico (Nb: 0,69 Å, Ta: 0,68 Å) e também no seu estado de valência (5^+), razão pela qual ocorrem sempre em conjunto (Tabela 1; Dill, 2010).

Tabela 1 - *Propriedades Físico-Químicas dos metais Nb e Ta. Fonte: Mackay & Simandl (2014); British Geological Survey, 2011*

	Ta	Nb
Número atómico	73	41
Massa atómica	180,94788	92,90638
Ponto de fusão (°C)	2996	2468
Ponto de ebulição (°C)	5425	4930
Densidade (g/cm ³)	16,7	8,57
Raio atómico (pm)	145	145
Resistividade elétrica (nΩm) a 25°C	134	144
Conductividade térmica (W/[m K])	57	54

Nos anos mais recentes, 50-60% do Ta tem sido utilizado na produção de poeiras de óxidos de Ta para o fabrico de condensadores, indispensáveis na maior parte dos aparelhos eletrónicos portáteis, tais como telemóveis, computadores, câmaras digitais, sistemas de navegação GPS entre outros. Algumas destas aplicações fazem com que o Ta seja importante, tanto a nível económico, como estratégico, na maioria dos países industrializados. Já o uso mais comum para o Nb é, de longe, a produção de certos tipos de aço (Mackay & Simandl, 2014).

O Nb e o Ta são constituintes essenciais numa variedade de espécies minerais, as quais são óxidos na sua maioria (Tabela 2). O Nb e o Ta também substituem iões principais noutros minerais, nos quais eles apresentam tipicamente baixas concentrações. Por exemplo, o Ta pode ser incorporado na estrutura da cassiterite até 4% de Ta₂O₅ (Dill, 2010). A vasta maioria das espécies economicamente importantes são óxidos.

Tabela 2 – Principais minerais de Tântalo

Mineral	Fórmula
Tantalite-(Mn)	MnTa_2O_6
Tantalite-(Fe)	FeTa_2O_6
Tapiolite	$(\text{Fe,Mn})(\text{Ta,Nb})_2\text{O}_6$
Wodginite	$\text{MnSnTa}_2\text{O}_8$
Ixiolite	$(\text{Ta,Mn,Nb})\text{O}_2$
Fluorcalciomicrolite	$(\text{Ca,Na, })_2\text{Ta}_2\text{O}_6\text{F}$

O grupo mineral columbotantalite é composto pelas espécies minerais Columbite-(Fe), Columbite-(Mn), Columbite-(Mg), Tantalite-(Fe), Tantalite-(Mn), Tantalite-(Mg), sendo as mais comuns a Columbite-(Fe), Columbite-(Mn), Tantalite-(Fe) e a Tantalite-(Mn). O supergrupo mineral pirocloro é de grande importância económica, particularmente para o nióbio. O pirocloro é tipicamente encontrado como mineral primário em rochas ígneas alcalinas e carbonatitos. Os minerais de tântalo comuns são columbotantalite, microlite, wodginite e euxinite (Mackay & Simandl, 2014)

Ao longo dos fenómenos de diferenciação das rochas intrusivas, as concentrações de Nb e Ta tendem a aumentar (Dill, 2010). A carga iónica de ambos impede que estes se acomodem na estrutura comum dos minerais vulgares de formação de rochas tais como os feldspatos e as micas, e solubilizam estes elementos até que magmas alcalinos e calcoalcalinos atinjam uma fase pegmatítica. Assim, o Nb concentra-se preferencialmente em estados diferenciados tardios de intrusões alcalinas, ao passo que o Ta se concentra frequentemente em intrusões calcoalcalinas ácidas.

As mineralizações primárias de Nb e Ta são encontradas, à superfície, em pegmatitos e granitos alcalinos. Em rochas magmáticas félsicas altamente diferenciadas, é comum verificar-se a presença de minerais do grupo da columbite apresentando percentagem em Ta superior a Nb. Durante a meteorização das rochas magmáticas e dos pegmatitos, os minerais de Nb e Ta são retirados das rochas pelos agentes de meteorização, transportados e depois depositados, em conjunto com a cassiterite, em depósitos fluviais e aluvionares, do tipo *placer*, onde podem atingir

valores de teor económico e explorável, tanto como minério principal a ser explorado, como subproduto da cassiterite (~3000 ppm, Parra & Filipe, 2001).

2.1.1 Comportamento geoquímico do nióbio e tântalo

O nióbio e o tântalo encontram-se habitualmente no estado de valência 5⁺ e, neste estado de valência, apresentam um raio iónico semelhante (Linnen & Keppler, 1997; (Linnen, *et al.*, 2014). Os seus estados de valência elevados, juntamente com o seu raio iónico moderado, resulta em elementos com elevado potencial iónico e, sendo por isso referidos como *high field strength elements* (HFSE) (Tabela 3 e Figura 2).

Tabela 3 - Abundância dos elementos Nb e Ta, em ppm's, que são HFSE, em diferentes reservatórios. Fonte: Linnen & Cuney, 2005

Elemento	Crusta Continental Superior	Crusta Continental Inferior	N-MORB
Nb	25	6	2,33
Ta	2,2	1,0	0,132

As diferenças entre a carga e o tamanho destes iões e os dos elementos mais abundantes (Si, Al, K, Na, Fe, Mg, etc), faz com que o Nb e o Ta não entrem diretamente nas estruturas dos silicatos comuns constituintes das rochas, sendo por isso considerados incompatíveis (Linnen *et al.*, 2014).

O comportamento químico de ambos os elementos será semelhante e geralmente são elementos altamente incompatíveis, em sistemas magmáticos. Existem algumas fases acessórias, nomeadamente a titanite e, mais importante, o rútilo, que concentram fortemente Nb e Ta. Assim, quantidades pequenas destas fases podem controlar o comportamento de ambos os elementos, particularmente em magmas siliciosos onde as solubilidades das fases acessórias são bastante inferiores (Linnen & Keppler, 1997).

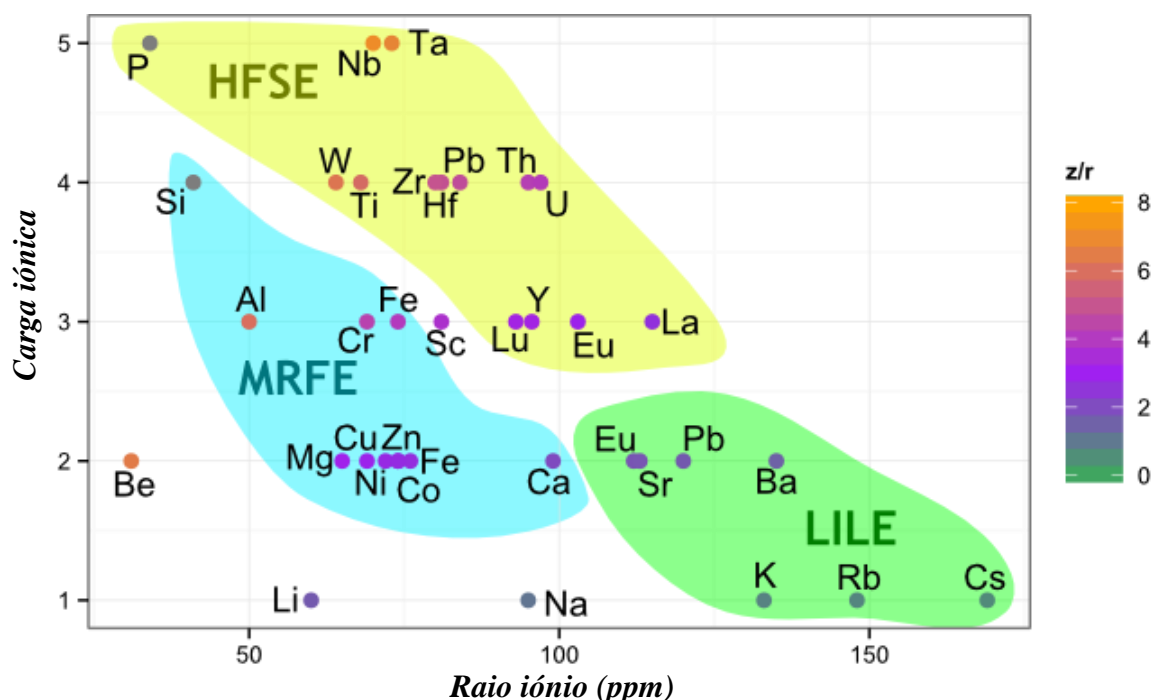


Figura 2 - Gráfico de relação entre o raio iónico e o estado de valência (carga iónica) dos elementos (HFSE - High field strength elements; MRFE - Mantle Rock Formation elements; LILE - Large ion lithophile elements). Fonte: Stackoverflow, 2016

A columbotantalite é o principal portador de Nb e Ta em granitos peraluminosos¹ altamente evoluídos e pegmatitos (Linnen & Keppler, 1997). O rútilo é a fase mais importante portadora de Nb e Ta numa vasta amplitude de rochas metamórficas. O comportamento de Nb e Ta durante a fusão parcial destas rochas é portanto fortemente controlado pela presença de rútilo. O rútilo forma uma série de soluções sólidas extensas com columbite devido à semelhança estrutural destas fases. De facto, a tapiolite desordenada, a qual é um polimorfo tetragonal de columboantalite tem uma estrutura semelhante ao rútilo, apresentado uma substituição do tipo $\text{Fe}^{2+} + 2\text{Ta}^{5+} \leftrightarrow 3\text{Ti}^{4+}$ (Linnen & Keppler, 1997). A maior parte do Nb e Ta é incorporado no rútilo através de soluções sólidas com um membro final de columbite (Columbite-(Mn), Columbite-(Fe), entre outros), e sob condições de temperaturas magmáticas esta solução sólida está provavelmente próxima da mistura ideal (Linnen & Keppler, 1997).

A maior parte dos minerais contendo concentrações de elementos raros exibem uma ampla variação composicional, variando, em escala, desde zonas submicroscópicas em cristais individuais, a rochas numa série de intrusões geneticamente relacionadas (Linnen *et al.*, 2014).

As concentrações de elementos raros em sistemas magmáticos variam em função de fenómenos de fusão parcial e cristalização fracionada (Linnen *et al.*, 2014).

¹ Rica em alumínio: $\left(\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}\right) \gg 1$ (razão molar)

Em grande parte, as assinaturas de elementos traço refletem a fonte e o contexto tectónico. Os jazigos exploráveis, ou potencialmente exploráveis, de Nb e Ta estão genética e espacialmente associados a rochas ígneas intrusivas ultra-alcalinas (Lovozero, Rússia; Ilímaussaq, Gronelândia) ou alcalinas a peralcalinas (Ghurayyah, Arábia Saudita; Khaldzan-Buregtey, Mongólia) e carbonatitos (St. Lawrence *graben*, Quebec, Canadá; Araxá, Brasil), e ocorrem em regiões de ascensão mantélica epirogénica subcontinental (Linnen *et al.*, 2014).

Os granitos peralcalinos² apresentam uma assinatura mais enriquecida em elementos traço. Nestes casos, geralmente os teores de Nb apresentam valores aproximados a 1000 ppm, enquanto os teores de Ta não atingem os 100 ppm (Linnen & Cuney, 2005; Linnen *et al.*, 1997, 2014). Isto contrasta com as composições dos elementos traço de granitos peraluminosos. Em granitos peraluminosos as concentrações de Nb são muito inferiores (~100ppm). Por contraste, o Ta é enriquecido apresentando valores superiores a 100 ppm (Linnen & Cuney, 2005; Linnen *et al.*, 2014).

As anfíolas e a perovskite são, provavelmente, as reservas mais importantes de Nb e Ta no *melt* (Dalou *et al.*, 2009; Tiepolo, *et al.*, 2000), apesar de que se for verificada a presença de titanite, esta irá afetar fortemente a concentração de Nb e Ta no *melt* (Prowatke & Klemme, 2005).

Em contraste com os *melts* carbonatíticos e peralcalinos, os *melts* peraluminosos são gerados em contexto orogénico e a sua assinatura de elementos traço é controlada pela posição do protólito (Linnen *et al.*, 2014). Para magmas de fontes crustais, a natureza das fases acessórias na rocha fonte e a solubilidade destas fases nos *melts* desempenham um papel essencial no controlo do teor de elementos traço no *melt*. O Nb e o Ta são geralmente controlados por fases de Ti, primariamente rútilo, titanite, magnetite e ilmenite (Linnen & Cuney, 2005; Linnen *et al.*, 2014).

2.1.1.1 Solubilidade do tântalo em *melts* silicatados

A composição do *melt* toma um papel essencial no controlo da solubilidade dos elementos HFSE nos *melts* silicatados. O “efeito peralcalino” baseia-se no facto da solubilidade dos elementos HFSE estar diretamente relacionada com a percentagem de álcalis no *melt* (Linnen *et al.*, 2014).

A solubilidade da columbite e da tantalite aumenta com o teor de álcalis nos *melts* peralcalinos. O comportamento do Nb e do Ta em *melts* peraluminosos difere do Zr e do Hf, e pode ser uma consequência da formação de ligações com Al, o que não ocorre com Zr e Hf (Van Lichtenvelde *et al.*, 2010). Em *melts* graníticos peralcalinos, a razão

² Ricos em álcalis com razão molar: $\frac{Al_2O_3}{Na_2O+K_2O} < 1$

Nb/Ta não irá variar com a cristalização de columbite, no entanto em casos de *melts* peraluminosos a solubilidade da tantalite é superior à da columbite resultando num decréscimo sucessivo de Nb/Ta durante a cristalização destes *melts* (Linnen *et al.*, 2014). Os membros de ferro (Columbite-(Fe), tantalite-(Fe)) das columbotantalites são mais solúveis que os membros de manganês (Columbite-(Mn), tantalite-(Mn)) (Linnen & Cuney, 2000 *in* Linnen *et al.*, 2014). Isto deveria levar a um enriquecimento em Fe durante a cristalização de columbotantalites, no entanto o que se verifica é um enriquecimento em Mn. Esta tendência de enriquecimento em Mn pode ser explicada pela cristalização de turmalina e moscovite que controla a razão Fe/Mn do *melt* (Linnen & Cuney, 2000 *in* Linnen *et al.*, 2014).

O lítio aumenta a solubilidade da columbite e da tantalite, mas diminui a solubilidade do Zr e Hf nos *melts* haplograníticos³ (Linnen, 1998 *in* Linnen *et al.*, 2014). No caso de outros elementos raros, a solubilidade é fortemente dependente da temperatura (Linnen *et al.*, 2014). A composição de *melts* peraluminosos é fortemente dependente da temperatura, ao passo que a composição de *melts* peralcalinos é menos dependente da temperatura.

2.1.1.2 Solubilidade do nióbio e tântalo em complexos hidrotermais

Existe pouca informação relativamente à complexação hidrotermal do Nb e Ta e quanto à solubilidade dos minerais chave de Nb e Ta (Linnen *et al.*, 2014). Zraiskiy *et al.* (2010) determinaram a solubilidade de Ta₂O₅ e de columbite com Ta em soluções com F⁻, Cl⁻, HCO₃⁻, e CO₃⁻² a uma temperatura de 300-550°C. A presença de F⁻ aumenta exponencialmente a solubilidade de ambas as fases, indicando a presença de complexos aquosos de F⁻ ou de OH⁻. O valor máximo atingido para a solubilidade da columbite é de ~10⁻²m para o Ta e Nb, em soluções HF a 300°C.

2.2 Tipo de jazigos de tântalo e nióbio

A mineralização de tântalo e de nióbio ocorre em jazigos do tipo primário ou secundário (Figura 3, Linnen *et al.*, 2014). Os jazigos do tipo primário são predominantemente associados a rochas ígneas, onde a mineralização é de origem magmática ou hidrotermal, e pode ser subdividida de acordo com a sua associação ígnea:

³ Termo utilizado por petrólogos experimentais para misturas de quartzo e feldspatos sintéticos sem minerais máficos: (do grego *haploos* = simples; Bowen, 1915)

- i. Carbonatitos: estas rochas acolhem a maior parte dos recursos de Nb mundiais e, historicamente, produzem a maior parte das terras raras mundiais;
- ii. Rochas graníticas peralcalinas e subsaturadas em sílica: a mineralização nestas rochas é caracterizada por apresentar elevadas concentrações de REE-Y-Nb-Zr, e, em alguns casos, também se verificam elevadas concentrações de Ta.
- iii. Rochas graníticas metaluminosas e peraluminosas: estas rochas são o tipo principal de rochas mundiais que possuem os jazigos de Ta mundiais mais importantes.
- iv. Aplitepegmatitos do tipo LCT e NYF: os principais pegmatitos de exploração de tântalo pertencem à subclasse de elementos raros e lítio, pertencentes à família LCT (Li-Cs-Ta); os favoráveis à obtenção de nióbio pertencem à família NYF (Nb-Y-F).

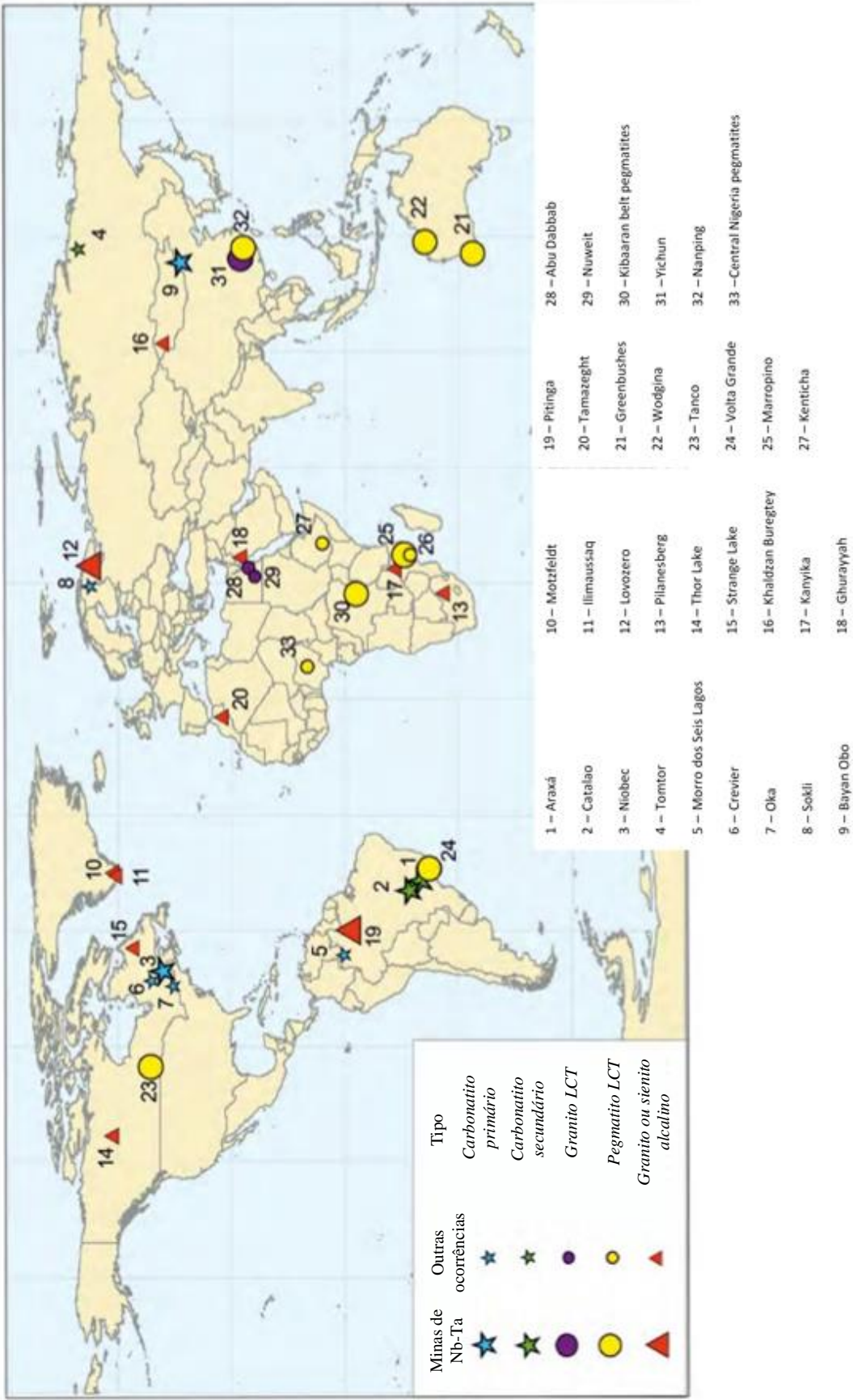


Figura 3 - Distribuição geográfica dos principais jazigos e outras ocorrências mundiais de Ta e Nb. Fonte: British Geological Survey, 2011

O tântalo é obtido através de pegmatitos, granitos peraluminosos de elementos raros, os seus equivalentes ricos em alteração, em jazigos do tipo plácer que são explorados artesanalmente, principalmente como um subproduto da exploração de estanho (Mackay & Simandl, 2014). Várias empresas de prospeção estão a avaliar complexos carbonatíticos para recuperar tântalo como um coproduto do nióbio (Canadá) (Chong *et al.* 2012 *in* Mackay & Simandl, 2014). Alguns dos maiores jazigos de nióbio e tântalo variam, em idade, desde 2.8 Ga até 85 Ma, aproximadamente.

2.2.1 Jazigos de tântalo relacionados com pegmatitos (fonte primária da maioria dos *placers* de Sn-Ta)

Os pegmatitos são rochas ígneas de grão grosseiro, com cristais, na sua maioria, com dimensões superiores a 1 cm, podendo estar localizados numa variedade de contextos tectónicos e metamórficos. Estes podem apresentar-se sob a forma de soleiras, diques e massas de formato irregular, com menos de 1 m de espessura e com extensões que podem variar entre algumas dezenas até centenas de metros ao longo da sua direção. Os pegmatitos são constituídos principalmente por feldspato potássico, albite e quartzo±moscovite e/ou biotite. Eles podem ser divididos em 5 classes: abissais, de moscovite, de moscovite de elementos raros, de elementos raros e miarolíticos, de acordo com o seu ambiente geológico e a sua geoquímica (Cerný & Ercit, 2005). De um ponto de vista de exploração de tântalo, a classe de elementos raros é a mais importante.

Os pegmatitos graníticos são semelhantes em termos de composição de elementos maiores, na sua mineralogia, na sua génese, e no contexto tectónico em relação aos granitóides dos quais eles derivam; contudo, eles são vulgarmente mais enriquecidos em elementos raros. Tendo por base um critério petrogenético, eles podem ser subdivididos em 3 famílias (Tabela 4, Cerný & Ercit, 2005): a família LCT (enriquecida em Li, Cs e Ta), a família NYF (enriquecida em Nb, Y e F) e família mista NYF+LCT relativamente mais rara, com características mineralógicas e químicas coincidentes com ambas (Cerný & Ercit, 2005). O grau de fracionamento aumenta com a distância a que os pegmatitos se encontram dos seus granitos parentais cogenéticos (Cerný & Ercit, 2005).

Tabela 4 - Classificação petrogenética dos pegmatitos graníticos. Fonte: Cerný & Ercit, 2005

Família	Subclasse pegmatítica	Assinatura geoquímica	Composição média do pegmatito	Granitos associados	Composição do granito	Fontes litológicas
LCT	REL-Li MI-Li	Li, Rb, Cs, Be, Sn, Ga, Ta>Nb, (B, P, F)	Peraluminoso a subaluminoso	Sinorogénicos a tardi-orogénicos (a anorogénicos); amplamente heterogéneos	Peraluminoso, de tipo I, S ou misto S+I	Gnaisses de base e rochas supracrustais de crosta média a superior enriquecida
NYF	REL-REE Mi-REE	Nb>Ta, Ti, Y, Sc, REE, Zr, U, Th, F	Subaluminoso a metaluminoso (a subalcalino)	Sin-, tardi-, pós- a principalmente anorogénicos; são quase homogéneos	Peraluminosos a subaluminosos e metaluminosos; Tipos A e I	Granulitos de crosta inferior a média empobrecida, ou granitóides juvenis
Mistos	LCT + NYF	Mistura	Metaluminosos a moderadamente peraluminosos	Pós-orogénicos a anorogénicos; heterogéneos	Subaluminosos a levemente peraluminosos	Protólitos mistos ou assimilação de granitos NYF supracrustais

A família LCT de pegmatitos apresenta afinidade petrogenética com granitos enriquecidos em elementos raros de tipo S peraluminosos e metaluminosos (Cerný & Ercit, 2005). Estes pegmatitos ocorrem frequentemente em contextos orogénicos, encontram-se associados a fenómenos de subducção e colisão continental, e encontram-se localmente adjacentes a cúpulas graníticas ou alinhados ao longo de falhas profundas (Cerný & Ercit, 2005). Muitos destes pegmatitos apresentam texturas sin-cinemáticas (Hatcher & Clynick, 1990 *in* Cerný & Ercit, 2005). Os pegmatitos que foram historicamente, ou são atualmente, explorados para extração de tântalo (bem como de Li, Cs e Sn) pertencem à família de pegmatitos LCT. Os pegmatitos altamente fracionados podem conter centenas de minerais acessórios exóticos contendo Li, Rb, Cs, Ta, Nb, Be, Y, REE's, Mo com a presença de H₂O, F, B₂O e P₂O₅. O teor em elementos raros (mais especificamente em Li, Cs, Be, Ta e Nb), a razão Ta/Nb e o grau de albitização aumentam com o aumento da distância entre o pegmatito e a fonte da intrusão (Figura 4 e 5; Cerný & Ercit, 2005; Mackay & Simandl, 2014).

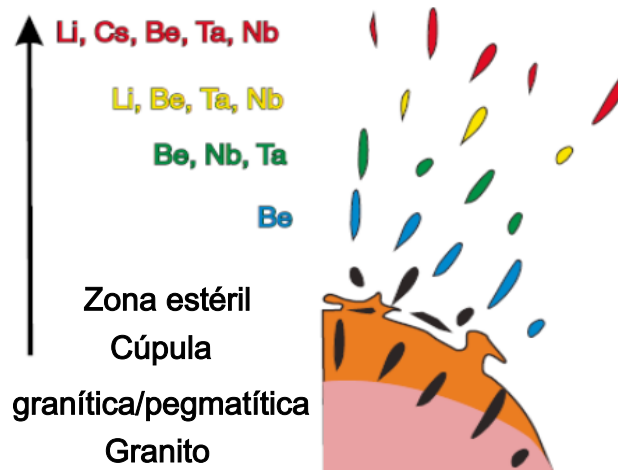


Figura 4 - Representação esquemática da relação granito-pegmatito num campo pegmatítico. Fonte: Mackay & Simandl, 2014

Os pegmatitos LCT têm teor em Ta substancialmente superior ao apresentado pelos granitos peraluminosos enriquecidos em elementos raros ou depósitos de carbonatitos (Mackay & Simandl, 2014).

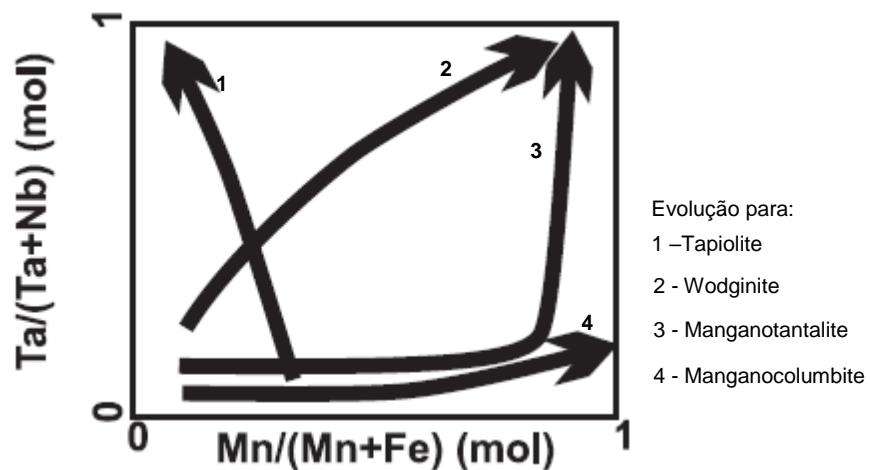


Figura 5 - Tendências típicas para a composição das columbotantalites em pegmatitos LCT. Fonte: Linnen & Cuney, 2005; Cerný et al., 1986

Os pegmatitos da família NYF encontram-se sobretudo em contextos anorogénicos continentais e podem resultar do fracionamento de granitos de tipo A e I metaluminosos (Cerný & Ercit, 2005). Eles partilham também características com as fases pegmatíticas de complexos peralcalinos e carbonatíticos (Martin & De Vito, 2005, Martin, 2007 in Mackay & Simandl, 2014), e podem ser mineralizados.

2.2.2 Jazigos complexos peralcalinos de nióbio-tântalo-REE

As rochas ígneas peralcalinas apresentam um índice de saturação em alumina ($\frac{K_2O+Na_2O}{Al_2O_3} > 1$ (razão molar), e são principalmente instaladas durante atividades extensivas no interior de contextos continentais anorogénicos (Pitcher (1983), (1993), Barbarin (1990) in Mackay & Simandl (2014)). No entanto, em alguns casos não foram

preservadas provas do contexto tectónico original. Todas as intrusões peralcalinas são enriquecidas em HFSE, contudo, isto é de facto verídico para variedades agpaíticas⁴ contendo silicatos complexos de Zr-Ti-REE tais como a eudialyte⁵, mosandrite⁶ e rinkite⁷ (Gerasimovskii (1956), Sørensen (1960), (1968) *in* Mackay & Simandl (2014)). Este tipo de intrusões agpaíticas podem ser amplamente subdivididas em duas categorias: (a) intrusões estratiformes (Lovozero, Rússia) ou (b) intrusões mais homogéneas (Strange Lake, Canadá). Ambos os tipos de intrusão são frequentemente afetados por remobilização hidrotermal (Gysi & Williams-Jones, 2013 *in* Mackay & Simandl, 2014). Os complexos peralcalinos contém frequentemente fases pegmatíticas altamente evoluídas com uma afinidade NYF altamente enriquecida em elementos HFSE e mineralização magmática, a qual pode ser remobilizada durante processos de autometassomatismo ou metassomatismo tardio (Martin, 2007 *in* Mackay & Simandl, 2014).

2.2.3 Jazigos de tântalo±nióbio relacionados com granitos peraluminosos

O enriquecimento de Ta±Nb em granitos está frequentemente associado com intrusões peraluminosas a metaluminosas enriquecidas em elementos raros. As rochas graníticas são consideradas peraluminosas quando apresentam uma razão molar $\frac{Al}{CaO+Na_2O+K_2O} > 1$ [Shand, 1927, Clarke, 1981, *in* Mackay & Simandl, 2014].

Os granitos enriquecidos em elementos raros são encontrados em contextos tectónicos orogénicos e pós-tectónicos (Linnen & Cuney, 2005). O seu teor em elementos raros aumenta, enquanto o seu teor em Sr, Ba, Ti e Zr decresce com o aumento do grau de fracionamento da rocha [Cerny & Meintzer, 1985, Breaks *et al.*, 2003 *in* Mackay & Simandl, 2014]. A razão Mg/Li na análise da rocha total é um dos melhores indicadores do seu grau de fracionamento, isto é a razão diminui com o aumento do fracionamento (Breaks *et al.*, 2003, *in* Mackay & Simandl, 2014). Os granitos enriquecidos em elementos raros são constituídos por quartzo, plagioclase, feldspato alcalino e um ou mais minerais característicos, tais como biotite, moscovite, granada, cordierite, estaurolite, cianite, andalusite, silimanite, mulite, topázio, turmalina, espinela e corindo (Clarke, 1981 *in* Mackay & Simandl, 2014). Em alguns casos, estes granitos apresentam cúpulas greisenizadas e/ou em forma de *stockscheider* (granitos

⁴ Variedades semelhantes a sienitos nefelínicos hiperalcalinos

⁵ $Na_{15}Ca_6Fe_3Zr_3Si(Si_{25}O_{73})(O,OH,H_2O)_3(Cl,OH)_2$

⁶ $(Ca_3REE)[(H_2O)_2Ca_{0.5}\square_{0.5}]Ti(Si_2O_7)_2(OH)_2(H_2O)_2$

⁷ $TiNa_2Ca_4REE(Si_2O_7)_2OF_3$

pneumatoliticamente⁸ alterados) contêm quartzo, moscovite, lepidolite, topázio e, frequentemente, turmalina, fluorite, volframite, cassiterite com berilo acessório ou minerais de tântalo e nióbio (Linnen & Cuney, 2005; Cerný & Meintzer (1988), Lin *et al.*, (1995) *in* Mackay & Simandl (2014)).

2.2.4 Fontes secundárias de tântalo

Os jazigos do tipo *placer* são fontes muito importantes de Ta, Zr, e Hf (Mackay & Simandl, 2014). As fontes secundárias foram historicamente responsáveis por aproximadamente 40% da produção de tântalo global (Schwartz *et al.*, 1995 *in* Mackay & Simandl, 2014). Os depósitos de tipo *placer* de cassiterite na Tailândia e Malásia foram explorados pelo seu teor em estanho (Sn). Contudo, Ta₂O₅ derivado de columbotantalite e rútilo de Ta-Nb (estruverite) foi também recuperado nestes depósitos (Hassan, 1994, Schwartz *et al.*, 1995, *in* Mackay & Simandl, 2014).

⁸ Granitos os quais sofreram alteração através da intervenção de gases mineralizadores (B, F e P) durante o final da evolução magmática do magma granítico. Estes voláteis permitem a formação de minerais como a moscovite, turmalina, berilo, apatite e topázio, entre os mais comuns

As rochas graníticas que ocorrem nesta área são, na sua maioria tardi- a pós-tectónica relativamente à terceira fase de deformação dúctil da orogenia varisca (D3), sendo a sua fácies mais abundante, porfiróide e de granularidade grosseira.

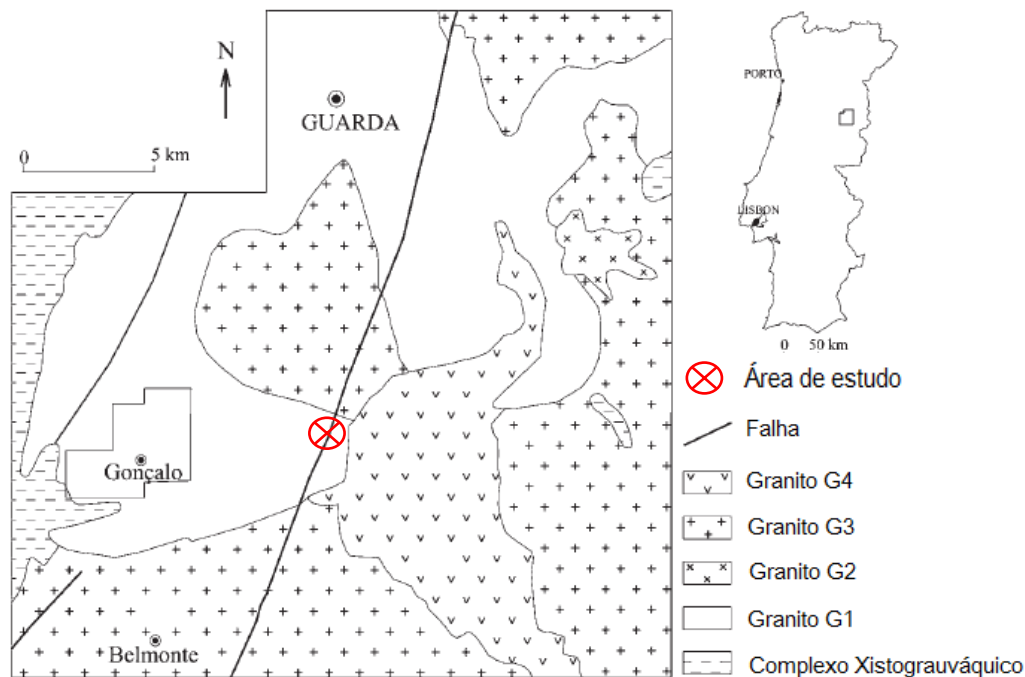


Figura 7 - Localização geográfica da área de estudo e mapa regional da área de estudo. Fonte: Neiva & Ramos, 2010

Neiva & Ramos (2009) consideram a existência de quatro tipos fundamentais de granitos, na região, designados por G1, G2, G3 e G4. O granito G1 é um granito porfiróide de duas micas de grão grosseiro a muito grosseiro, o G2 um granito porfiróide de duas micas de grão médio a fino, G3 um granito de duas micas de grão grosseiro e o G4 é um granito de duas micas de grão médio a grosseiro. G1, G2 e G3 são tardi-D3, ao passo que G4 é um granito pós-D3. Tal como referido nos estudos de Neiva & Ramos (2009) obtiveram-se idades de 301 ± 3 Ma para G1, G2 e G3, e $293,9 \pm 0,5$ Ma para G4.

Os granitos contêm quartzo, microclina micropertítica, plagioclase, biotite, clorite, moscovite, zircão, apatite, monazite, ilmenite e rútilo. Todos os granitos contêm fenocristais de microclina e são peraluminosos, o que segundo Ballouard, *et al.* (2015) e Ballouard, *et al.* (2016) se granitos deste tipo apresentarem $\frac{Nb}{Ta} < 5$ (percentagem de massa) tratam-se geralmente de granitos mineralizados. Nos granitos G1 e G3 é possível observar fenocristais de albite-oligoclase e no granito G2 observam-se fenocristais de albite-andesina. Na maior parte dos granitos a plagioclase da matriz é de albite-oligoclase, à exceção de G4 que é de albite.

As estruturas frágeis regionais que afetaram as diferentes litologias albergam corpos filoníticos de quartzo e de rochas básicas. Na generalidade, os primeiros têm orientações NE-SW, NNE-SSW e, em alguns casos, NW-SE. São constituídos por quartzo leitoso, podendo apresentar um aspeto brechóide, sendo quase sempre verticais. As rochas básicas, apresentam normalmente cor escura e grão muito fino,

ocorrendo em alguns casos, corpos com espessura da ordem decimétrica a métrica, verticais ou subverticais, e com orientação E-W, NW-SE e NNW-SSW. Por vezes estes diques acompanham os filões de quartzo. É de salientar que esta área se situa na “Subprovíncia Uranífera das Beiras”, pois nela ocorrem numerosos filões de quartzo brechóide, dos quais vários foram explorados nas décadas de 1940 a 1980, onde a mineralização é constituída por pecheblenda e por minerais secundários de urânio, nomeadamente autunite e torbernite.

Na região centro leste de Portugal aflora um conjunto de intrusões graníticas que sublinham zonas de cisalhamento dúctil associadas com a 3ª fase de deformação hercínica (Ramos, 2010). Nesta região foram definidas as principais unidades geológicas aflorantes: unidades do complexo xisto-grauváquico ante-Ordovícico, unidades do tipo granitóide, rochas filonianas e depósitos sedimentares e aluvionares do Quaternário (Ramos, 1998; Figura 8). O granito pertence à grande intrusão hercínica, fazendo parte do maciço batolítico da Beira, originado no final do Carbónico. Assim, a unidade geológica mais antiga da região é representada por testemunhos da extensa formação sedimentar que, no início do Paleozóico, cobria grande parte do ocidente peninsular. Trata-se do CXG ante-ordovícico, intensamente atingido pelos granitos antes citados (Teixeira *et al.*, 1963).

A região da Guarda, essencialmente granítica, está muito fraturada e erodida. Os aspetos atuais são o resultado de uma longa evolução (Teixeira *et al.*, 1963).. Tendo em conta as taxas de erosão idênticas em todo o Quaternário, e semelhantes às atuais, é possível inferir que a geomorfologia da zona se manteve praticamente constante nas últimas dezenas de milhares de anos. Ações tectónicas importantes atingiram o maciço logo após a sua consolidação, fraturando-o e permitindo a instalação de filões ao longo das fraturas assim originadas (Teixeira *et al.*, 1963).. Algumas dessas ações relacionam-se com os próprios movimentos hercínicos nas suas derradeiras fases, enquanto outras, muito mais recentes, dizem respeito a atuações alpinas. Com as primeiras está relacionada a formação de filões pegmatíticos, aplito-pegmatíticos e dos filões hipotermiais de quartzo, com mineralização volframítica (Teixeira *et al.*, 1963)..

Em Portugal são raros os afloramentos graníticos que não revelem, associados, a presença de filões e massas de material pegmatítico ou aplitopegmatítico de dimensões variáveis (Ramos, 2010). Na região de Seixo Amarelo – Gonçalo – Belmonte, uma área de natureza essencialmente granítica, aflora um campo filoniano aplitopegmatítico com mineralizações de metais raros do tipo LCT, com lepidolite e petalite, constituído por soleiras sub-horizontais com espessura em geral até 3,5 m. Intruem essencialmente o granito porfiróide, predominantemente biotítico, de granuloso

grosseiro, tardi-D3, incluído na série intermédia e, esporadicamente, os xistos do complexo xistograuváquico (Ramos, 2010). Este campo filoniano instalou-se num sistema de fraturas, predominantemente sub-horizontais, que se terão desenvolvido durante a atuação de forças tangenciais, sub-horizontais, responsáveis pela formação de cisalhamentos NNE-SSW, como o caso da falha da Vilariça e sistemas paralelos (Ramos, 2010). Os filões e soleiras do campo filoniano aplitopegmatítico são maioritariamente LCT (Li, Cs, Ta) do tipo complexo, subtipo com lepidolite e petalite, terão intruído em níveis estruturais elevados e têm idade hercínica tardia (pós-D3).

A intrusão das soleiras aplitopegmatíticas no granito porfiróide provocou a formação de bandas de metassomatismo de contacto, paralelas aos encostos das soleiras, que em geral não ultrapassam 20 cm de espessura. Por sua vez a intrusão das soleiras aplitopegmatíticas com mineralizações de metais raros nas rochas xistentas determina a formação de orlas de metassomatismo de contacto com cerca de 10 cm a teto e a muro, onde a rocha xistenta ficou transformada numa corneana pelítica com quartzo, biotite, clorite, albite, zircão, turmalina, ilmenite, rútilo, berilo e óxidos de ferro (Ramos, 2010).

A distribuição espacial das soleiras aplitopegmatíticas na região de Seixo Amarelo – Gonçalo – Belmonte é fortemente controlada pela fraturação hercínica (Ramos, 2010). As soleiras aplitopegmatíticas com mineralizações de metais raros intruem os granitos, o complexo xistograuváquico, os pegmatitos estéreis e alguns aplitos e são intruídas por aplitos, filões quartzosos e doleríticos (Ramos, 1998).

A morfologia atual da região resultou, não só da atuação contínua e demorada dos agentes de erosão, mas houve, também, deslocamentos provocados pela atuação defalhas (Teixeira, et al., 1963). A própria ação de erosão foi, em numerosos casos, orientada por linhas ou zonas de fratura. Muitos rios da região seguem direções tectónicas, como é o caso da Ribeira da Gaia e da Ribeira de Maçainhas (Teixeira, et al., 1963).

3.2.1 Complexo xistograuváquico

As rochas de natureza xistenta formam um contacto bastante irregular com o granito, estando em parte controlado por falhas WNW-ESSE e NW-SE, as quais determinam a formação de uma apófise xistenta alongada na direção SE, que foi deslocada pelo rejeito de uma falha direita importante, com direção NW-SE (Ramos, 1998). Esta é constituída predominantemente por corneanas biotíticas e xistos mosqueados andaluzíticos e biotíticos. Na orla de metassomatismo de contacto de xistogranito, a rocha xistenta transforma-se em corneana pelítica. Nas proximidades do

contacto com os xistos, o granito da Guarda apresenta uma granularidade mais fina ocorrendo restos de encraves xistentos com 1.5 por 2 m.

Genericamente, na zona de metamorfismo de contacto, as rochas xistentas caracterizam-se pela alternância de leitos pelíticos finos com leitos mais quartzosos (Ramos, 1998). Há evidência de metassomatismo traduzido pela recristalização de moscovite tardia e lixiviação de biotite dando origem a clorite e moscovite (Ramos, 1998).

3.2.2 Granito da Guarda

O granito da Guarda constitui a rocha encaixante da maior parte das soleiras aplitopegmatíticas que afloram na região de Seixo Amarelo – Gonçalo (Ramos, 1998). A rocha evidencia macroscopicamente nalguns locais uma foliação magmática, que se traduz na orientação sub-paralela dos megacristais de feldspato e, por vezes, no alinhamento local das biotites e agregados quartzo feldspáticos. Ocorre alguma deformação, por vezes intensa, em faixas bem definidas alinhadas ao longo de fraturas importantes onde se verificaram deslocamentos cisalhantes (Ramos, 1998).

Os fenómenos metassomáticos que ocorrem em relação direta com pequenas fraturas abertas são semelhantes aos que ocorrem na zona de contacto com as soleiras aplitopegmatíticas (Ramos, 1998). A formação deste tipo de estruturas está de alguma forma relacionada com a circulação de fluidos metassomáticos quentes e tardios que não determinaram o preenchimento da fratura, mas modificaram as características químico-mineralógicas da rocha encaixante (Ramos, 1998).

Em vários locais observa-se o enrubescimento, por vezes intenso, do granito da Guarda, estando genericamente relacionado com a passagem de fraturas importantes. Caracterizam-se pela forte impregnação dos feldspatos com pigmento hematítico em finas pontuações micrométricas. A rubificação dos feldspatos deste granito envolve provavelmente a atuação de processos endogenéticos (Ramos, 1998).

3.2.3 Rochas filonianas

É frequente na região, a ocorrência de filões e massas de natureza aplítica (Ramos, 1998). A intrusão dos filões está de certa forma relacionada com a fraturação da região que apresenta orientação preferencial NE-SW, E-W, NNE-SSW.

A maioria dos filões e massas aplíticas é posterior à instalação do campo filoniano aplitopegmatítico com mineralizações de metais raros, mas alguns são nitidamente anteriores, nomeadamente os filões e massas de aplitos com biotite (Ramos, 1998).

Na região de Seixo Amarelo-Gonçalo os aplitos com rara biotite poderão representar os produtos da solidificação de um magma com composição intermédia,

entre a de um magma granítico residual e o magma pegmatítico que terá originado as soleiras do campo filoniano aplitopegmatítico com mineralizações de metais raros (Ramos, 1998).

O campo filoniano aplitopegmatítico com mineralizações de metais raros que aflora na região Centro-Leste de Portugal apresenta vários aspetos e características notáveis. As maiores concentrações ocorrem nas zonas de exocontacto de corpos graníticos circunscritos constituídos por granitos de duas micas (Ramos, 1998). Na generalidade, a grande maioria das estruturas mineralizadas apresenta uma atitude sub-horizontal. Naquilo que diz respeito ao tipo de mineralizações que as soleiras contêm genericamente, para além dos minerais essenciais como quartzo, feldspato potássico, albite, moscovite, estão também presentes minerais de lítio, nióbio, tântalo, estanho, entre outros (Ramos, 1998). Os teores deste tipo de mineralizações podem variar substancialmente, no entanto este tipo de associação caracteriza todo o campo filoniano. Para além de todos estes aspetos, o campo filoniano é caracterizado por uma ausência significativa de minerais de tungsténio, o que o torna nitidamente diferente de outros campos filonianos do mesmo tipo que ocorrem noutros locais do mundo.

De acordo com Ramos (1998) as soleiras aplitopegmatíticas litiníferas classificam-se como pegmatitos da classe “com elementos raros, do tipo complexo sub-tipo com lepidolite” enquanto as soleiras do tipo estanífero poderiam ser classificadas como pegmatitos da classe “com elementos raros, do tipo complexo sub-tipo com amblygonite”.

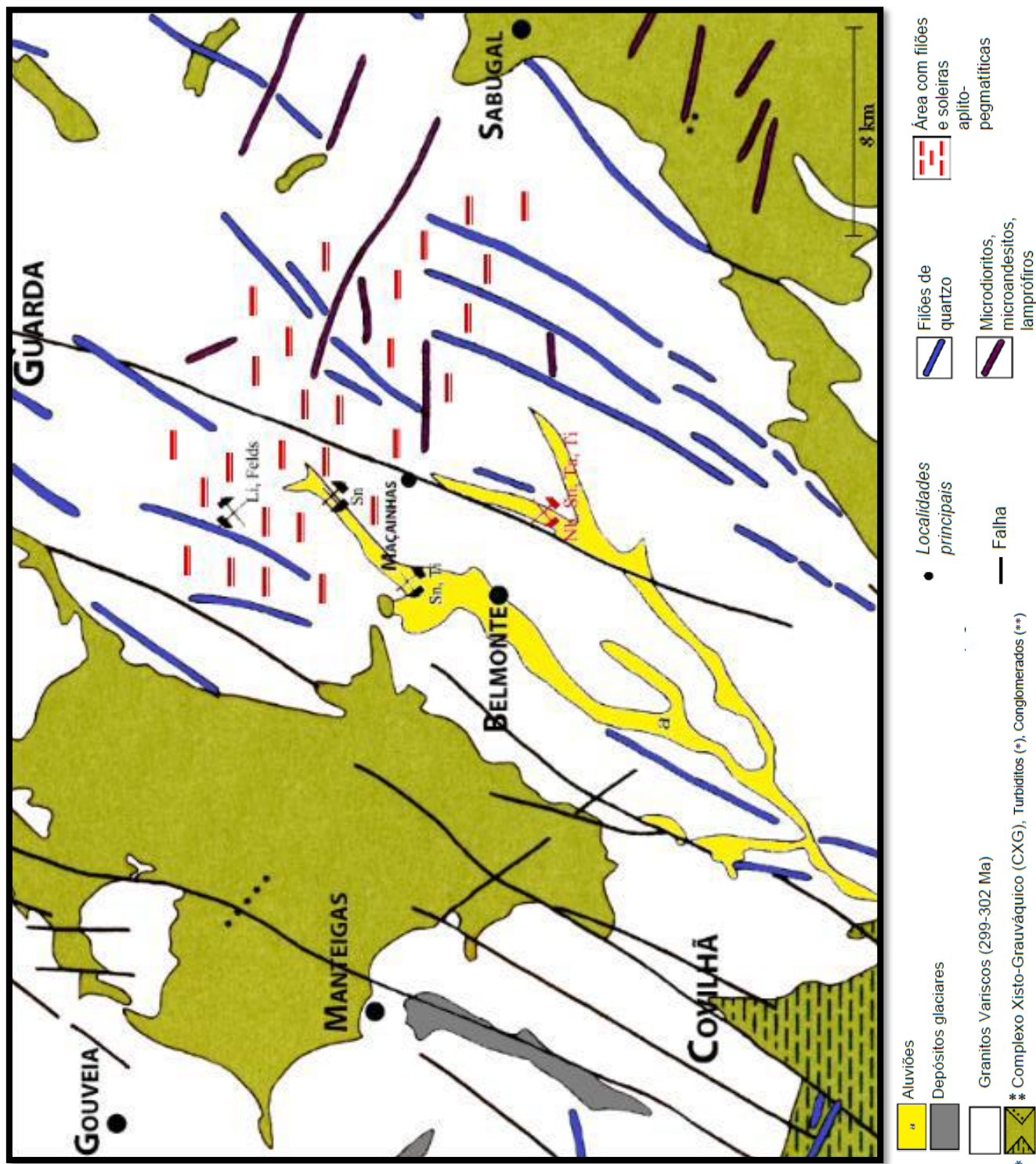


Figura 8 - Mapa geológico local da área de estudo. Adaptado de IGM, 1995

Capítulo 4. Resultados

As análises pontuais nas columbotantalites foram determinadas com recurso à microsonda eletrónica do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), em S. Mamede Infesta. As análises foram conduzidas utilizando uma voltagem de aceleração de 20 kV e um feixe de corrente de 20 nA. Algumas imagens de eletrões retrodifundidos de outros autores (Ribeiro, 2015; Fernandes, 2016) foram recolhidas no CEMUP, Universidade do Porto, através do microscópio eletrónico de varrimento, para selecionar cristais para análise quantitativa. Na microsonda eletrónica foram obtidas imagens de eletrões retrodifundidos de alguns grãos analisados.

Foi utilizado um concentrado de grãos do qual foi efetuada uma secção polida com um total de 51 grãos com dimensões entre 0,5mm e 2,0mm. No entanto, neste estudo só houve a possibilidade de se analisarem 10 grãos.

De acordo com o considerado noutros trabalhos (e.g. Melcher *et al.*, 2015) consideramos como limite todas as análises que fecharam a mais que 97,5%.

Ao longo do trabalho são também referidos trabalhos, que irão ser utilizados como comparação, já que dizem respeito à mesma área de estudo. Os resultados obtidos após as análises efetuadas no LNEG apresentam-se na tabela 5 e 6, tendo em conta que a fórmula geral utilizada foi $(\text{Ta,Nb})_2(\text{Mn,Fe})\text{O}_6$.

Os principais elementos que foram tidos em conta para uma interpretação de resultados foram o Ta, Nb, Mn, Fe, W, Sn e Ti, os quatro primeiros elementos principais, e os três restantes elementos de substituição de grande importância.

As suas composições projetaram-se nos campos da ferrocolumbite, manganocolumbite, ferrotantalite e manganotantalite no quadrilátero FeNb_2O_6 – MnNb_2O_6 – FeTa_2O_6 – MnTa_2O_6 (Figura 9). De um modo geral, os grãos estudados são classificados como Columbites-(Mn) e Columbites-(Fe), isto é, encontram-se mais enriquecidos em Nb do que Ta e no que toca à concentração em Mn e Fe apresentam-se com um teor amplamente distribuído. É importante referir que não se verificou a presença de ixiolite, wodginite ou de microlite.

De forma a distinguir quimicamente columbotantalites de ixiolites-wodginites, projetaram-se os dados obtidos no diagrama triangular Nb-Ta estabelecido para o efeito por Neiva (1996) (Figura 10). As análises caem todas entre os limites paralelos definidos, correspondendo, portanto, a columbotantalites. Caso caíssem abaixo do último limite paralelo corresponderiam a ixiolites-wodginites, ou seja indicariam uma riqueza em W e Sn.

Tabela 5 - Resultado da análise, na microsonda, da amostra da Ribeira de Maçainhas, em percentagem de massa

	Ta₂O₅ (%)	Nb₂O₅ (%)	FeO (%)	MnO (%)	WO₃ (%)	SnO₂ (%)	TiO₂ (%)	Sc₂O₃ (%)	Bi₂O₃ (%)	Sb₂O₅ (%)	UO₂ (%)	Total (%)
7.1	19,23	57,15	5,22	13,64	1,09	0,31	1,33	0,01	-	-	0,83	98,81
7.2	19,40	57,22	5,15	13,62	0,91	0,35	1,60	0,01	-	0,01	1,10	99,36
7.3	40,17	36,54	4,89	11,53	0,78	0,78	2,63	-	-	-	0,13	97,45
7.4	39,55	39,18	5,31	11,97	0,80	0,45	0,92	-	0,02	-	0,43	98,62
17.1	10,58	63,70	5,67	14,23	3,22	0,23	1,76	-	-	-	0,41	99,80
22.1	19,29	55,69	5,11	13,59	2,55	0,87	2,83	0,01	-	-	0,37	100,31
22.2	34,88	41,72	7,79	9,75	2,18	0,59	1,85	-	-	-	0,12	98,88
23.1	29,62	47,13	10,98	7,45	2,12	0,44	2,03	-	-	-	0,26	100,02
23.2	22,62	54,26	11,42	7,37	1,78	0,24	1,61	-	-	-	0,28	99,58
41.1	37,24	39,25	7,63	9,23	1,24	0,36	2,12	-	-	-	0,91	97,99
41.2	34,79	41,72	7,75	9,67	1,10	0,45	2,18	-	-	0,01	1,20	98,87
41.3	21,24	55,55	8,04	11,05	1,37	0,23	1,38	-	-	0,01	0,29	99,16
43.1	47,93	28,70	9,84	6,68	1,47	0,56	2,16	0,03	-	-	0,27	97,64
43.2	26,46	52,06	13,81	4,83	0,97	0,08	0,72	0,02	-	0,02	-	98,97
44.1	24,20	52,27	10,45	8,60	2,41	0,25	1,70	-	0,04	-	0,09	100,02
44.2	37,83	38,73	0,01	10,25	1,31	0,39	0,39	2,01	6,55	0,01	0,25	97,72
44.3	38,51	39,53	10,56	7,05	1,71	0,34	1,94	-	0,04	0,01	0,18	99,87
45.1	21,73	54,99	6,58	13,69	1,11	0,23	0,86	0,01	-	-	0,26	99,46
45.2	52,19	26,43	6,13	9,37	0,79	0,76	2,20	-	-	-	1,06	98,93
47.1	28,98	48,16	9,27	8,83	1,17	0,64	1,57	-	-	0,02	0,19	98,82
47.2	28,71	47,07	9,89	8,54	1,42	0,75	1,66	-	-	-	0,12	98,16
47.3	40,72	36,07	8,28	8,00	0,70	0,99	3,22	-	-	-	1,09	99,07
48.2	48,18	28,83	8,17	8,06	1,36	1,55	2,51	-	-	-	0,09	98,75
48.4	14,07	63,74	8,51	11,74	1,15	0,24	1,03	-	-	0,01	0,03	100,52
48.5	14,44	62,5	8,98	11,05	1,16	0,28	1,12	-	-	-	0,11	99,63
Média	30,10	46,29	7,93	9,84	1,45	0,50	1,75	0,09	0,28	-	-	-
Desvio padrão	9,67	9,38	2,13	2,12	0,48	0,24	0,53	0,15	0,50	0,01	-	-

Tabela 6 - Resultados das fórmulas estruturais com base em 6 átomos de oxigénio e razões Ta/(Ta+Nb) e Mn/(Mn+Fe) em percentagem calculadas para a amostra estudada

	Ta	Nb	Fe	Mn	W	Sn	Ti	Sc	Bi	Sb	U	Ta/(Ta+Nb) x 100 (%)	Mn/(Mn+Fe) x 100 (%)
7.1	0,32	1,60	0,27	0,71	0,02	0,01	0,06	-	-	-	0,01	16,82	72,56
7.2	0,32	1,59	0,27	0,71	0,01	0,01	0,07	-	-	-	0,02	16,93	72,79
7.3	0,75	1,13	0,28	0,67	0,01	0,02	0,14	-	-	-	-	39,80	70,46
7.4	0,73	1,20	0,30	0,69	0,01	0,01	0,05	-	-	-	0,01	37,78	69,53
17.1	0,17	1,70	0,28	0,71	0,05	0,01	0,08	-	-	-	0,01	9,08	71,77
22.1	0,32	1,53	0,26	0,70	0,04	0,02	0,13	-	-	-	0,01	17,24	72,94
22.2	0,63	1,25	0,43	0,55	0,04	0,02	0,09	-	-	-	-	33,46	55,93
23.1	0,51	1,36	0,59	0,40	0,04	0,01	0,10	-	-	-	-	27,44	40,75
23.2	0,38	1,52	0,59	0,39	0,03	0,01	0,08	-	-	-	-	20,05	39,55
41.1	0,69	1,20	0,43	0,53	0,02	0,01	0,11	-	-	-	0,01	36,34	55,10
41.2	0,63	1,25	0,43	0,54	0,02	0,01	0,11	-	-	-	0,02	33,40	55,81
41.3	0,36	1,56	0,42	0,58	0,02	0,01	0,06	-	-	-	-	18,69	58,17
43.1	0,93	0,93	0,59	0,41	0,03	0,02	0,12	-	-	-	-	50,11	40,79
43.2	0,46	1,50	0,73	0,26	0,02	-	0,03	-	-	-	-	23,40	26,16
44.1	0,41	1,47	0,55	0,45	0,04	0,01	0,08	-	-	-	-	21,77	45,45
44.2	0,72	1,23	-	0,61	0,02	0,01	0,02	0,12	-	-	-	37,02	100,00
44.3	0,70	1,19	0,59	0,40	0,03	0,01	0,10	-	-	-	-	36,94	40,35
45.1	0,37	1,55	0,34	0,72	0,02	0,01	0,04	-	-	-	-	19,18	67,83
45.2	1,02	0,86	0,37	0,57	0,02	0,02	0,12	-	-	-	0,02	54,31	60,74
47.1	0,51	1,40	0,50	0,48	0,02	0,02	0,08	-	-	-	-	26,57	49,08
47.2	0,51	1,38	0,54	0,47	0,02	0,02	0,08	-	-	-	-	26,85	46,62
47.3	0,75	1,10	0,47	0,46	0,01	0,03	0,16	-	-	-	0,02	40,43	49,46
48.2	0,92	0,92	0,48	0,48	0,03	0,04	0,13	-	-	-	-	50,14	49,95
48.4	0,23	1,71	0,42	0,59	0,02	0,01	0,05	-	-	-	-	11,74	58,32
48.5	0,24	1,69	0,45	0,56	-	0,01	0,05	-	-	-	-	12,20	55,49

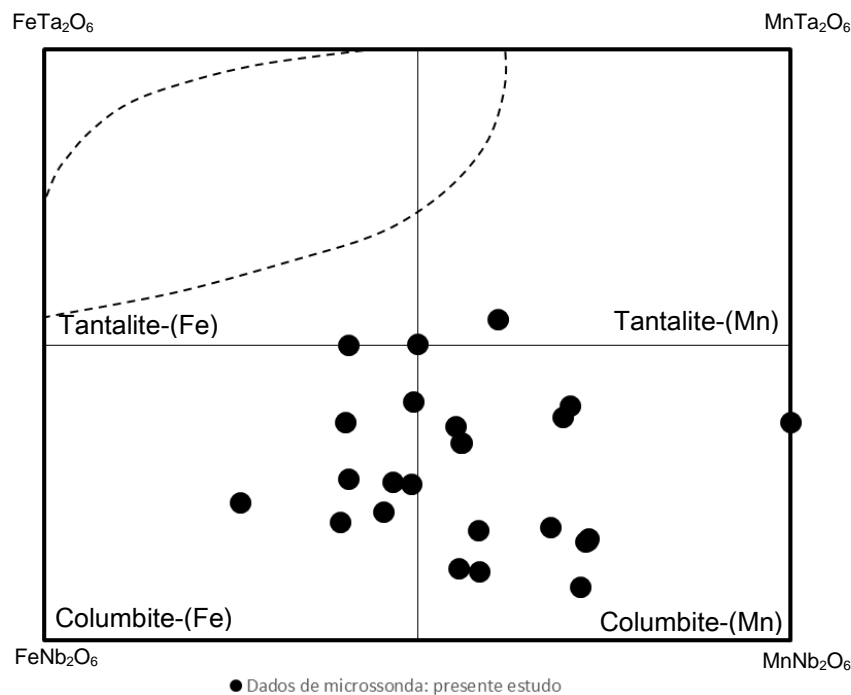


Figura 9 - Projeção das columbotantalites da amostra em estudo no quadrado composicional dos óxidos de Nb e Ta. A zona delimitada com tracejado preto separa as composições com estrutura da tapiolite (ponteadado superior) e da columbotantalite (ponteadado inferior)

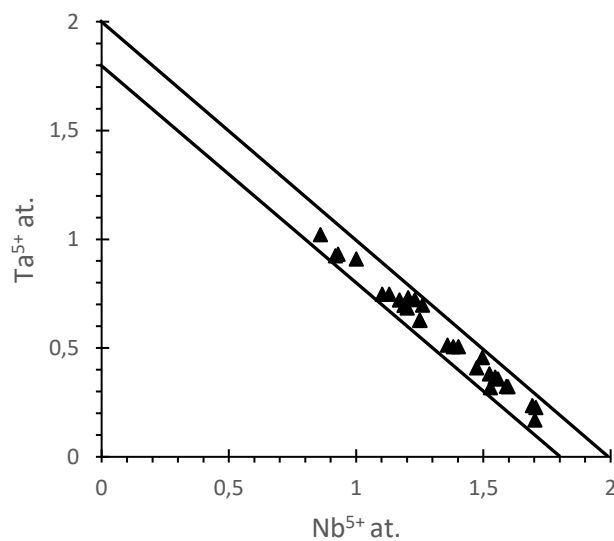


Figura 10 - Diagrama Nb^{5+} vs Ta^{5+} para as columbotantalites da Ribeira de Maçainhas. As duas retas delimitam os campos da columbotantalite (espaço entre as retas) e da ixiolite-wodginite (espaço abaixo do limite inferior), segundo Neiva (1996)

Composicionalmente (Figura 11), as columbotantalites estudadas apresentam uma larga variação no que respeita os elementos maiores: 10,58% a 52,19% em massa de Ta_2O_6 (média 30,10%), 26,43% a 63,74% em massa de Nb_2O_6 (média 46,29%), 0,01% a 13,81% em massa de FeO (média 7,93%), e 4,83% a 14,23% em massa de MnO (média 9,84%). No que toca aos elementos menores, o TiO_2 varia entre 0,39% e 3,22% (média de 1,75% TiO_2), o WO_3 varia entre 0,7% e 3,22% (média de 1,45% WO_3),

e para o SnO_2 varia entre 0,08% e 1,55% (média de 0,50% SnO_2). As razões Mn/Fe e Ta/Nb também apresentam grandes variações:

- $\frac{\text{Mn}}{\text{Mn}+\text{Fe}} \times 100 = 26,16\text{--}100$.
- $\frac{\text{Ta}}{\text{Ta}+\text{Nb}} \times 100 = 9,08\text{--}54,31$.

É importante referir que numa análise verifica-se uma substituição do Fe por Sc e Bi (análise 44.2) e ainda a baixa concentração de Ti. Em média, os grãos analisados apresentam concentrações de W e Ti 4 vezes superior à concentração de Sn. Ao longo de todas as análises o teor de U não ultrapassa os 200 ppm.

Ribeiro (2015) referiu que detetou a presença de grãos com zonamento oscilatório através de gráficos representativos como o da figura 11. Também neste trabalho, podemos afirmar que se verifica a presença de grãos com zonamento oscilatório, estando portanto em conformidade com os resultados obtidos por Ribeiro (2010).

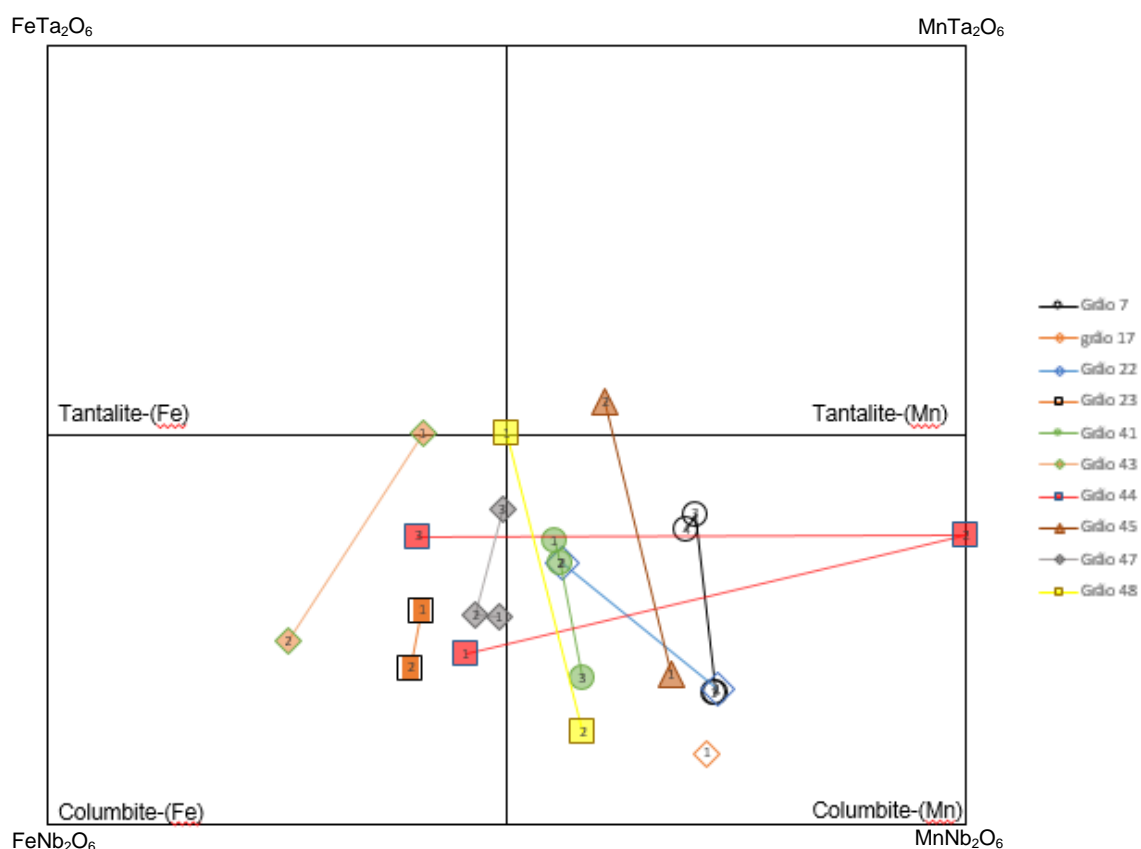
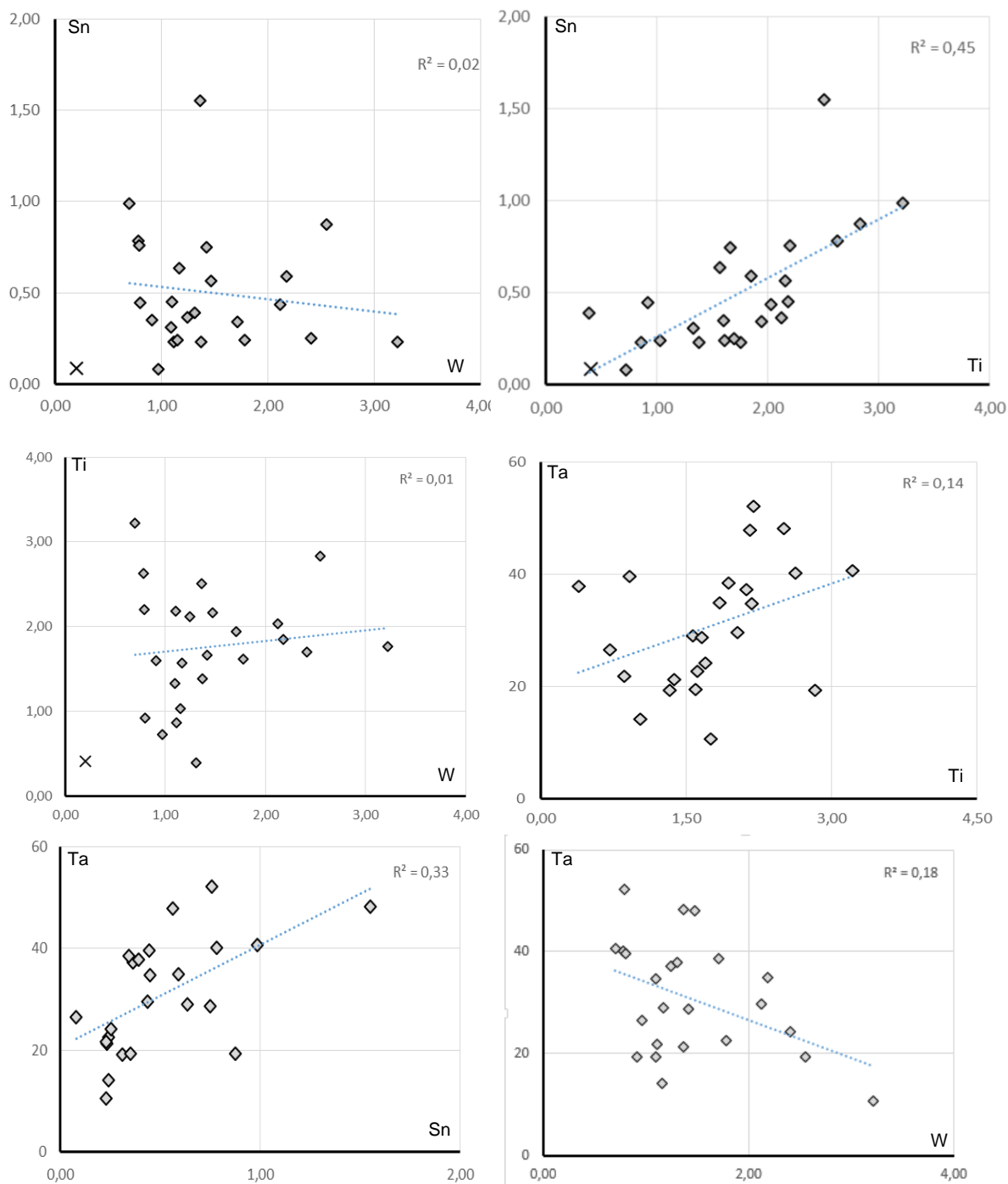


Figura 11 - Projeção do número de pontos analisados de acordo com as razões $\text{Ta}/(\text{Ta}+\text{Nb})$ e $\text{Mn}/(\text{Mn}+\text{Fe})$ em cada grão de columbotantalite da amostra em estudo

Os dados deste trabalho permitiram verificar a correlação entre os elementos menores e com o elemento principal Ta (Figura 12). De todos, os elementos que apresentaram uma maior correlação foram o Sn e o Ti, e o Ta e o Sn. Em todos os casos

verificou-se uma grande dispersão quando comparados com dados de Melcher, et al., 2016.



◆ Columbotantalites (Maçainhas)

✕ Melcher (mediana de análises feitas a milhares de grãos de óxidos minerais de Ta-Nb num conjunto de 29 províncias)

Figura 12 - Gráficos de correlação Sn-W, Sn-Ti, Ta-Ti, Ta-Sn e Ta-W (valores em percentagens de óxidos)

4.1 Texturas observadas

Foram observados diferentes tipos de zonamento nas columbotantalites (Figura 13). Dos 3 tipos simples descritos por Lahti (1987), dois foram identificados nos grãos estudados: zonamento oscilatório e zonamento descontínuo ou remendado (“patchy zoning”). O zonamento oscilatório foi o mais observado (Figuras 13 a, b, c, e). Texturas mais complexas como intercrescimentos irregulares tipo mosaico (“irregular mosaic-like intergrowths”) foram igualmente distinguidas (Figuras 13 c, d).

No caso do zonamento oscilatório verifica-se a presença de transições graduais (figura 13a), no entanto também se observam contactos bruscos (figura 13b). Este tipo de zonamento pode ser regular, manifestando-se em bandas largas ou finas, ou irregular.

Na figura 13d é possível observar na parte central do grão, intercrescimentos irregulares tipo mosaico. O zonamento irregular observou-se, por exemplo, no grão 43 (figura 13c).

Também foi possível observar casos em que não se verificou a presença de zonamento (figura 13f).

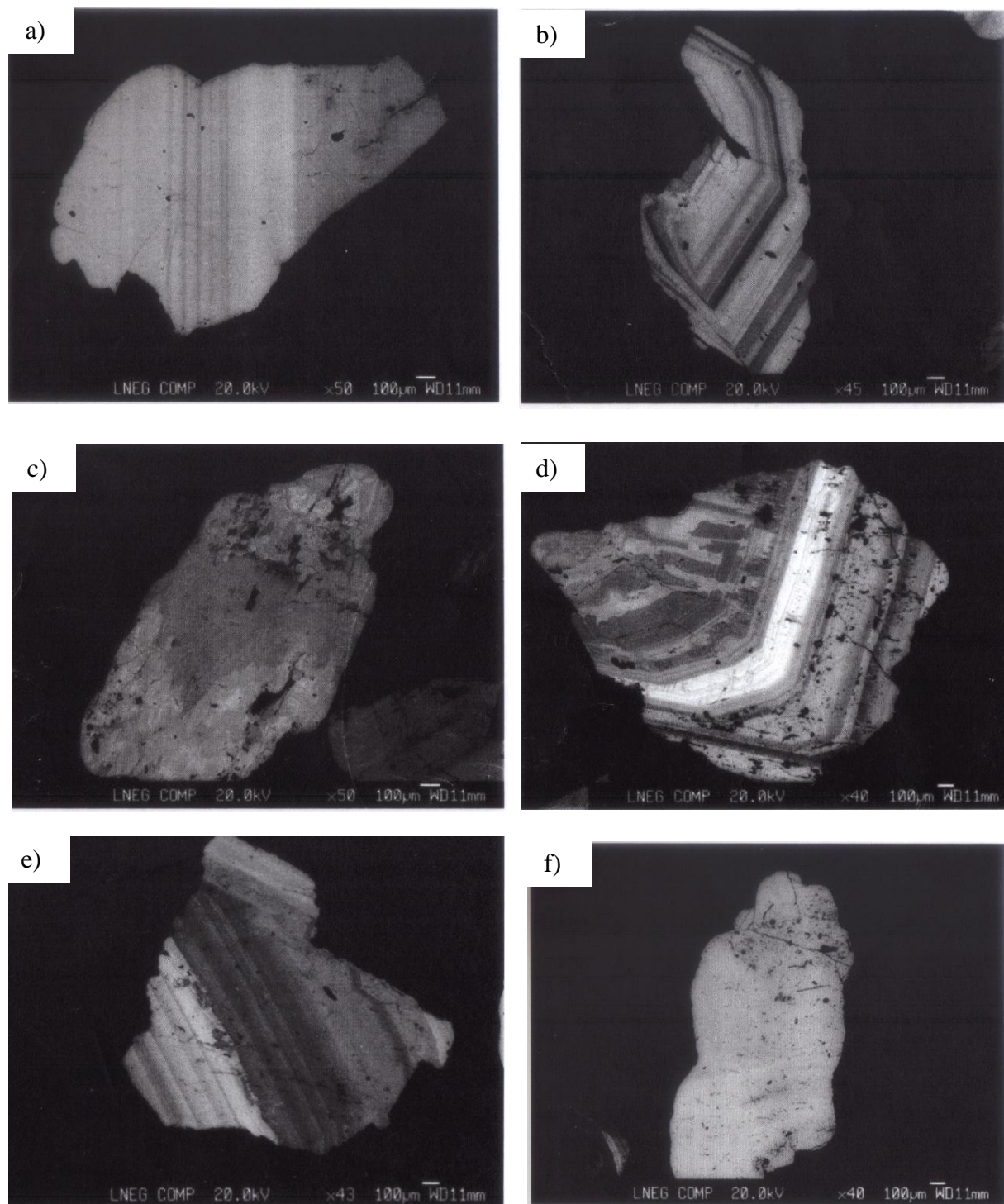


Figura 13 - Imagens obtidas através da microsonda eletrónica revelando algumas das texturas presentes nos grãos minerais estudados

4.2 Discussão de resultados

Os resultados obtidos apontam para razões de $\frac{Mn}{Mn+Fe}$ e $\frac{Ta}{Ta+Nb}$ com variações de 0,26 a 1 e de 0,09 a 0,54, respetivamente. Esta grande variedade composicional pode resultar de uma mistura de grãos de columbotantalite de diferentes tipos de soleiras e filões aplito-pegmatíticos drenados pela ribeira (e.g. Fernandes, 2016; Fernandes, 2015).

No que respeita aos teores de TiO_2 , de SnO_2 e de WO_3 de columbotantalites pertencentes a aplitopegmatitos estudadas na região, estes variam de 0,05-2,3% TiO_2 , de 0,05-0,80% SnO_2 e de 0,10-2,10% WO_3 na região de Gonçalo (Neiva & Ramos, 2009, 2010), e entre 0,86-4,03% TiO_2 , 0,06-0,7% SnO_2 e 0,61-2,45% WO_3 na região de Cabeço dos Poupas, Pena do Lobo-Sabugal (Neiva *et al.*, 2011). A variação do teor em TiO_2 é ligeiramente superior com a obtida para as columbotantalites da região. Porém, o teor de SnO_2 é bem mais elevado do que o reportado na mesma. Teores semelhantes foram descritos para o caso de columbotantalites estudadas no Maciço Central Francês, atingindo 1,37% em massa de SnO_2 (Belkasmi & Cuney, 1998).

Comparando os dados obtidos durante este trabalho com outros dados publicados, é visível uma grande correspondência a nível composicional com as columbotantalites das soleiras e filões aplito-pegmatíticos litiníferos e berilíferos e com os filões pegmatíticos que intruíram o granito da Pega (Neiva *et al.*, 2012), assim como uma grande similaridade composicional com as columbotantalites das soleiras da mina de Li de Gonçalo, que corresponde ao campo pegmatítico a oeste da Ribeira da Gaia (Neiva & Ramos, 2010).

A geomorfologia da região manteve-se praticamente constante, o que implica que nenhuma destas áreas pode ter alimentado os aluviões desta linha de água, dada a existência de obstáculos, como a ribeira e as zonas de cumeada.

Fernandes (2016) descreveu a presença de outras fases minerais em grãos de columbotantalites estudados na ribeira de Maçainhas. Foram descritos tanto minerais com Nb-Ta na sua estrutura como minerais sem estes elementos e ainda a presença de inclusões de minerais do grupo da microlite. O estudo feito por Ribeiro (2015) foi essencialmente qualitativo, centrando-se sobretudo no tipo de zonamento e padrões texturais observados. Os grãos estudados por este autor apresentam na sua generalidade uma maior riqueza em Nb, mas sendo em grande parte concordantes com os resultados do trabalho de Fernandes (2016) e com o presente trabalho (Figura 14).

Os padrões texturais fornecem-nos informações importantes acerca da evolução das fases de Nb-Ta. O zonamento deve-se a variações na concentração de elementos maiores, essencialmente o Ta e o Nb.

O zonamento reflete uma cristalização fracionada sem equilíbrio a partir do material parental, e é causado pela difusão lenta de Nb e Ta no *melt*, quando comparado com a taxa de crescimento do cristal. À medida que o cristal cresce, a sua composição evolui localmente para composições mais ricas em Ta e Mn e, quando o crescimento periodicamente cessa, há uma retoma a composições mais ricas em Nb (Neiva *et al.*, 2008). Lahti (1987) considera que os principais fatores no controlo do zonamento oscilatório são a dinâmica de crescimento dos cristais, a concentração e difusão dos elementos principais, e os fluxos sucessivos de fluidos magmáticos-hidrotermais no canal intrusivo. O zonamento regular oscilatório é muitas vezes interpretado como sendo uma textura primária que resultou de uma cristalização a partir de um fluido magmático (e. g. Lahti, 1987; Van Lichtenvelde *et al.*, 2007). A predominância de contactos graduais indica que ocorreu um reequilíbrio difuso, enquanto que nos grãos com contactos bruscos não terá havido reequilíbrio fase-fluido (Linnen & Cuney, 2005).

O zonamento descontínuo ou remendado é caracterizado por uma fase zonada irregular que substitui zonas regulares anteriores (Van Lichtenvelde *et al.*, 2007). O zonamento descontínuo junto com os intercrescimentos irregulares tipo mosaico são indicativos de recristalização pós-magmática, de origem metamórfica ou hidrotermal, resultante de lixiviação parcial, substituição ou alteração metassomática (e. g. Lahti, 1987; Badanina *et al.*, 2015). O zonamento descontínuo e os intercrescimentos irregulares tipo mosaico foram descritos em vários locais, um pouco por todo o mundo, quer em columbotantalites provenientes de pegmatitos (e. g. Van Lichtenvelde *et al.*, 2007; Badanina *et al.*, 2015), quer de *placers* (Uher *et al.*, 2007).

Neste trabalho, de acordo com os padrões texturais verificou-se a ocorrência de dois eventos principais de cristalização (e. g. Fernandes, 2016; Uher *et al.*, 2007): um evento magmático primário que foi responsável pela existência de grãos com zonamento oscilatório regular, bem como pelos grãos sem zonamento, e um evento pós-magmático responsável pelas restantes texturas.

Noutros estudos foi possível distinguir também dois eventos principais de cristalização: um magmático primário responsável pelo zonamento regular oscilatório e rítmico regular (bifásico) oscilatório, bem como pelos cristais homogéneos, e um evento pós-magmático responsável pelas restantes texturas (Fernandes, 2016). Já Ribeiro (2015) identificou apenas dois tipos principais de zonamento: oscilatório e inverso. Nos estudos feitos por este último autor as columbotantalites apresentaram 3,44% em massa

de TiO_2 e 10,51% em massa de SnO_2 . As razões de $\text{Mn}/(\text{Mn}+\text{Fe})$ e $\text{Ta}/(\text{Ta}+\text{Nb})$ apresentaram variações, respetivamente, de 0,26 a 0,97 e de 0,1 a 0,95. Os resultados apresentam uma grande variedade composicional, que pode resultar de uma mistura de grãos de columbotantalite de diferentes tipos de soleiras e filões aplito-pegmatíticos drenados pela ribeira de Maçainhas e pela ribeira da Gaia, sendo concordantes com os resultados de Fernandes (2016) e Ribeiro (2015) (Figura 14).

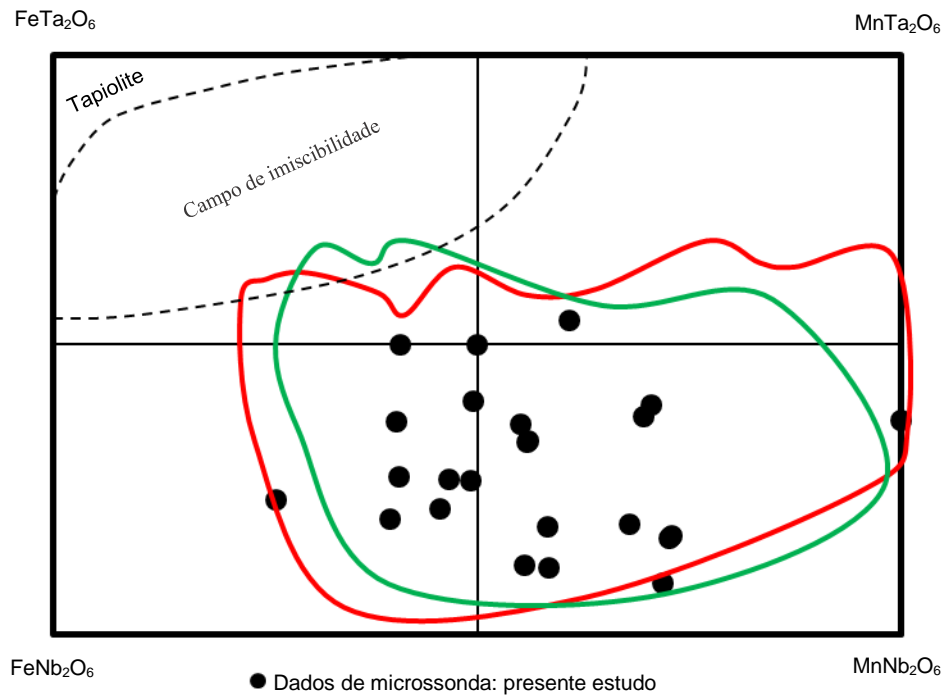


Figura 14 – Projeção das columbotantalites analisadas neste estudo e comparação com os dados de Ribeiro (2015) (campo delimitado a verde) e de Fernandes (2016) (campo delimitado a vermelho)

Capítulo 5. Conclusões

As columbotantalites, e em particular as tantalites, são os minerais mais importantes na indústria, para obtenção de tântalo.

Este trabalho é pioneiro na divulgação de resultados quantitativos de microsonda de Sn-Ti-Ta nas columbotantalites das antigas minas aluvionares da região da Guarda

Os minerais do grupo da columbotantalite são a fase de Nb-Ta estudada neste trabalho. Verificou-se que todas as análises (exceto uma) são de Columbite-(Mn) e Columbite-(Fe). As columbotantalites revelaram razões de Mn/(Mn+Fe) e Ta/(Ta+Nb) variam, respetivamente, de 0,26 a 1,00 e de 0,09 a 0,54 e podem apresentar até 3,22% em massa de TiO₂, 1,55% em massa de SnO₂ e 3,22% em massa de WO₃. Esta grande variedade composicional pode resultar de uma mistura de grãos de columbotantalite de diferentes tipos de soleiras e filões aplito-pegmatíticos drenados pela ribeira de Maçainhas.

O zonamento observado em vários dos minerais estudados deve-se a uma variação na concentração em elementos maiores, nomeadamente em Ta e Nb. O zonamento oscilatório foi o mais observado, sendo uma textura primária resultante de processos de cristalização magmática (e.g. Lahti, 1987). Podem haver transições graduais e/ou bruscas. As transições graduais são indicativas da ocorrência de um reequilíbrio difuso, ao passo que as transições bruscas indicam a ausência de um equilíbrio motivada por interrupção, seguida de novo fluxo magmático.

Os intercrescimentos irregulares anédricos tipo mosaico e os zonamentos irregulares e descontínuos são, provavelmente, um produto de lixiviação parcial pós-magmática no estado *subsolidus* e subsequente substituição e recristalização (e.g. Uher et al., 2007). Assim, pode-se sugerir a existência de dois eventos de cristalização principais: o primeiro, magmático, responsável pelo zonamento regular oscilatório, bem como pelos grãos sem zonamento; e um segundo, pós-magmático, responsável pelas restantes texturas.

As columbotantalites estudadas terão resultado do dismantelamento de filões e soleiras a NE das antigas minas (*placers*) de Maçainhas, estruturas essas que se encontram assinaladas na carta geológica 1:50 000 de Belmonte. Assim, é de realçar a importância desta região e o seu potencial no que diz respeito à prospeção de Ta nos pegmatitos a NE, local de onde terão resultado as columbotantalites dos aluviões.

Capítulo 6. Referências bibliográficas

- ALEMDASAULAS'S BLOG. (21 de Novembro de 2016). Fonte: <https://alemdasaulas.wordpress.com/2010/10/08/carta-geologica-de-portugal-2/>
- Badanina, E., Sitnikova, M., Gordienko, V., & Melcher, F. G.-E. (2015). Mineral chemistry of columbite-tantalite from spodumene pegmatites of Kolmozero, Kola Peninsula (Russia). *Ore Geology Reviews*, 64, 720-735.
- Ballouard, C., Poujol, M., Boulvais, P., Branquet, Y., Tartèse, R., & Vigneresse, J. L. (2015). Is the Nb-Ta Fractionation a Marker of an Interaction with Fluids in Peraluminous Granites? *13th SGA Biennial Meeting*, (pp. 1-4). Nancy - France.
- Ballouard, C., Poujol, M., Boulvais, P., Branquet, Y., Tartese, R., & Vigneresse, J. L. (Março de 2016). Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: a marker of the magmatic-hydrothermal transition. *Geology*, 44(3), 231-234.
- Belkasmí, M., & Cuney, M. (1998). Les columbo-tantalites zonées du granite de Montebrias (Massif central français). Implications pétrogénétiques. *Académie des sciences*, 326, 459-465.
- Bowen, N. L. (1915). The crystallization of haplobasaltic, haplodioritic and related magmas. *American Journal of Science*, 40, 161-185.
- British Geological Survey. (Abril de 2011). Niobium-Tantalum. pp. 1-27.
- Cerný, P., & Ercit, T. S. (2005). The classification of granitic pegmatites revised. *The Canadian Mineralogist*, 43, 2005-2026.
- Cerny, P., Goad, B., Hawthorne, F., & Chapman, R. (1986). Fractionation trends of the Nb- and Ta-bearing oxide minerals in the Greer Lake pegmatitic granite and its pegmatite aureole, southeastern Manitoba. *American Mineralogist*, 71, 501-517.
- Chakhmouradian, A. R. (2006). High-field-strength elements in carbonatitic rocks: Geochemistry, crystal chemistry and significance for constraining the sources of carbonatites. *Chemical Geology*, 235, 138-160.
- Dalou, C., Koga, K. T., Hammouda, T., & Poitrasson, F. (2009). Trace element partitioning between carbonatitic melts and mantle transition zone minerals: Implications for the source of carbonatites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 239-255.
- Dill, H. G. (2010). The "chessboard" classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth-Science Reviews*, 100, 129-136.
- Fernandes, J. (2016). *Relatório da Unidade Curricular "Estágio" do 3º ano da Licenciatura em Geologia*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
- Instituto Geológico Mineiro (IGM). (1995). *Carta Geológica de Portugal, à escala 1:500 000, Folha 1*. Lisboa.
- International Mineralogical Association. (2016). *The New IMA List of Minerals - A work in Progress*.

- Kjarsgaard, B. A., & Mitchell, R. H. (2004). Solubility of niobium in the system $\text{CaCO}_3\text{-CaF}_2\text{-NaNbO}_3$ at 0.1 GPa pressure: implications for the crystallization of pyrochlore from carbonatite magma. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148, 281-287.
- Lahti, S. I. (1987). Zoning in columbite-tantalite crystals from the granitic pegmatites of the Eräjärvi area, southern Finland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 509-517.
- Linnen, R. L., & Cuney, M. (2005). Granite-related rare-element deposits and experimental constraints on Ta-Nb-W-Sn-Zr-Hf mineralization, in Linnen RL and Samson IM, eds., rare-element geochemistry and mineral deposits. *Geological Association of Canada, GAC, Short Course Notes 17*, (pp. 45-66).
- Linnen, R. L., & Keppler, H. (1997). Columbite solubility in granitic melts: Consequences for the enrichment and fractionation of Nb and Ta in the Earth's crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 128, 213-227.
- Linnen, R. L., Samson, I., Williams-Jones, A. E., & Chakhmouradian, A. R. (2014). Geochemistry of the rare-earth elements, Nb, Ta, Hf and Zr deposits. Em H. D. Holland, & K. Turekian, *Treatise on Geochemistry* (Vol. 13, pp. 554-561). Elsevier Ltd.
- Mackay, D. A., & Simandl, G. J. (2014). Geology, market and supply chain of niobium and tantalum - a review. *Miner Deposita*, 1025-1047.
- Melcher, F., Graupner, T., Gäbler, H.-E., Sitnikova, M., Oberthür, T., Gerdes, A., . . . Chudy, T. (2016). Mineralogical and chemical evolution of tantalum-(niobium-tin) mineralisation in pegmatites and granites. Part 2: Worldwide examples (excluding Africa) and an overview of global metallogenetic patterns. *Ore Geology Reviews*, 1-42. Fonte: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.03.014>
- Neiva, A. M. (1996). Geochemistry of cassiterite and its inclusions and exsolution products from tin and tungsten deposits in Portugal. *The Canadian Mineralogist*, 34, 745-768.
- Neiva, A. M., & Ramos, J. M. (2009). Petrogenetic links of granitic aplite-pegmatite sills from Gonçalo with granites from Guarda-Belmonte area, Central Portugal. *Estudos Geológicos*, XIX(2), 251-252.
- Neiva, A. M., & Ramos, J. M. (2010). Geochemistry of granitic aplite-pegmatite sills and petrogenetic links with granites, Guarda-Belmonte area, central Portugal. *European Journal of Mineralogy*, 22, 837-854.
- Neiva, A. M., Gomes, C. L., & Silva, P. B. (2015). Two generations of zoned crystals of columbite-group minerals from granitic aplite-pegmatite in the Gouveia area, Central Portugal. *European Journal of Mineralogy*, 27, 771-782.
- Neiva, A. M., Silva, P. B., & Ramos, J. M. (2011). Geochemistry of granitic aplite-pegmatite veins and sills and their minerals from the Sabugal area, central Portugal. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen: Journal of Mineralogy and Geochemistry*, 189(1), 51-55.

- Neiva, A., Gomes, M., Ramos, J., & Silva, P. (2008). Geochemistry of granitic aplite-pegmatite sills and their minerals from Arcozelo da Serra area (Gouveia, Central Portugal). *European Journal of Mineralogy*, 20, 465-485.
- Neiva, A., Silva, P., & Ramos, J. (2012). Geochemistry of granitic aplite-pegmatite veins and sills and their minerals from the Sabugal area, Central Portugal. *Neues Jahrbuch für Mineralogie*, 189, 49-74.
- Parra, A., & Filipe, A. (2001). Ocorrências portuguesas de columbo-tantalites. *Boletim de Minas*, 38(2), 63-66.
- Prowatke, S., & Klemme, S. (2005). Effect of melt composition on the partitioning of trace elements between titanite and silicate melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3), 695-709.
- Ramos, J. M. (1998). Mineralizações de metais raros de Seixo Amarelo - Gonçalo (Guarda): contribuição para o seu conhecimento. *Tese de Doutoramento*. Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Ramos, J. M. (2010). Aplitopegmatitos com mineralizações de metais raros de Seixo Amarelo - Gonçalo. O recurso geológico. Em J. M. Neiva, A. Ribeiro, L. M. Victor, F. Noronha, Ramalho, & M. M., *Ciências Geológicas - Ensino e Investigação e sua História* (Vol. II, pp. 121-130). Associação Portuguesa de Geólogos - Sociedade Geológica de Portugal.
- Ribeiro, R. (2015). *Relatório da Unidade Curricular "Estágio" do 3º ano da Licenciatura em Geologia*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
- Stackoverflow. (2 de Agosto de 2016). Fonte: Earth Science beta: <http://earthscience.stackexchange.com/questions/2950/what-are-the-high-field-strength-and-large-ion-lithophile-hfs-or-hfse-lil-or>
- Tabela Periódica Completa - A Tabela Periódica dos Elementos Químicos Atualizada. (2 de Agosto de 2016). Fonte: <http://www.tabelaperiodicacompleta.com/>
- Teixeira, C., Martins, J. A., Medeiros, A. C., Pilar, L., Ferro, M. N., & Mesquita, L. P. (1963). Carta Geológica de Portugal, na escala 1/50 000: Notícia Explicativa da Folha 18-C - Guarda. Lisboa, Portugal: Serviços Geológicos de Portugal.
- Tiepolo, M., Vannucci, R., Oberti, R., Foley, S., Bottazzi, P., & Zanetti, A. (2000). Nb and Ta incorporation and fractionation in titanian pargasite and kaersutite: crystal-chemical constraints and implications for natural systems. *Earth and Planetary Science Letters*, 176, 185-201.
- Uher, P., Zitnan, P., & Ozdín, D. (2007). Pegmatitic Nb-Ta oxide minerals in alluvial placers from Limbach, Bratislava Massif, Western Carpathians, Slovakia: compositional variations and evolutionary trend. *Journal of Geosciences*, 52, 133-141.
- Van Lichtenvelde, M., Holtz, F., & Hanchar, J. M. (2010). Solubility of manganotantalite, zircon and hafnon in highly fluxed peralkaline to peraluminous pegmatitic melts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160, 17-32.
- Van Lichtenvelde, M., Salvi, S., Beziat, D., & Linnen, R. (2007). Textural features and chemical evolution in tantalum oxides: magmatic versus hydrothermal origins for

Ta mineralization in the Tanco Lower Pegmatite, Manitoba, Canada. *Economic Geology*, 102, 257-276.

Zaraisky, G. P., Korzhinskaya, V., & Kotova, N. (2010). Experimental studies of Ta₂O₅ and columbite-tantalite solubility in fluoride solutions from 300 to 550°C and 50 to 100 MPa. *Mineralogy and Petrology*, 99, 287-300.